

Ключевые геологические процессы в рудоносных мафит-ультрамафитовых интрузивных комплексах по данным одномерного термального моделирования

Степенщиков Д.Г. , Грошев Н.Ю. *, Иванов А.Н., Сущенко А.М.

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, * – groshev@ksc.ru

Аннотация. В статье рассматривается термальная история мафит-ультрамафитовых интрузивов Мончегорского, Федорово-Панского и Норильского рудоносных комплексов, прослеженная с помощью модернизированной версии авторского программного обеспечения Gehenna 2.2. Остывание горячих тел, визуализируется термограммами в координатах «глубина-время». На примерах показан потенциал термального моделирования для выявления и иллюстрации ключевых процессов образования сульфидного оруденения в мафит-ультрамафитовых системах.

Ключевые слова: термальное моделирование, мафиты, ультрамафиты, расслоенные интрузии, сульфиды, ЭПГ, Кольский регион, Норильский рудоносный комплекс.

Key Geological Processes in Ore-Bearing Mafic-Ultramafic Igneous Complexes Based on 1D Thermal Modeling Data

Stepenshchikov D.G. , Groshev N.Yu. *, Ivanov A.N., Sushchenko A.M.

Geological Institute, KSC RAS, Apatity, * – groshev@ksc.ru

Abstract. In this paper we trace the thermal history of the mafic-ultramafic intrusions of the Monchegorsk, Fedorova-Pana, and Norilsk ore-bearing complexes using an upgraded version of the author's software Gehenna 2.2. The cooling of hot bodies is visualized by thermograms in the «depth-time» coordinates. The examples show the potential of thermal modeling to reveal and illustrate the key processes of formation of sulfide mineralization in mafic-ultramafic systems.

Key words: thermal modeling, mafic, ultramafic, layered intrusions, sulfides, PGE, Kola region, Norilsk ore-bearing complex.

Введение

В статье рассматривается термальная история мафит-ультрамафитовых интрузивов на примерах Мончегорского (МК), Федорово-Панского (ФПК) и Норильского (НК) рудоносных комплексов. Для этого используется модернизированная версия авторского программного обеспечения Gehenna 2.2 (доступно по запросу у авторов), в которой остывание горячих тел моделируется дискретным решением уравнения теплопроводности (Степенщиков, Грошев, 2019) и визуализируется термограммами «глубина-время» (рис. 1).

Мончегорский комплекс

Вкрапленное сульфидное Cu-Ni-ЭПГ оруденение повсеместно развито на контакте многофазного Мончегорского плутона, преимущественно ультрамафитовой части МК в Кольском регионе (Шарков, Чистяков, 2016; Семенов и др., 2022; Чашин, Иванченко, 2022). Согласно модели, принятой нами за опорную (Karykowski et al., 2018), данное оруденение связано с предварительным нагревом (ПН) вмещающих пород, до внедрения рудоносной магмы, содержащей рассеянные сульфиды (рис. 2). Нагрев стимулирует следующие последовательные процессы (рис. 2 С, D):

- 1) обширное частичное плавление фундамента и образование пегматитов (700°С);
- 2) добавление действующего как флюс флюида из пегматитов в магму или кристаллическую кашу с температурой 1200°С;
- 3) частичное плавление кумулусных минералов (ортопироксен, оливин) в кристаллической каше, снижающее вязкость интеркумулусного расплава в зоне контакта;
- 4) просачивание сульфидной жидкости через интеркумулусное пространство пониженной вязкости и их накопление вдоль контакта плутона.

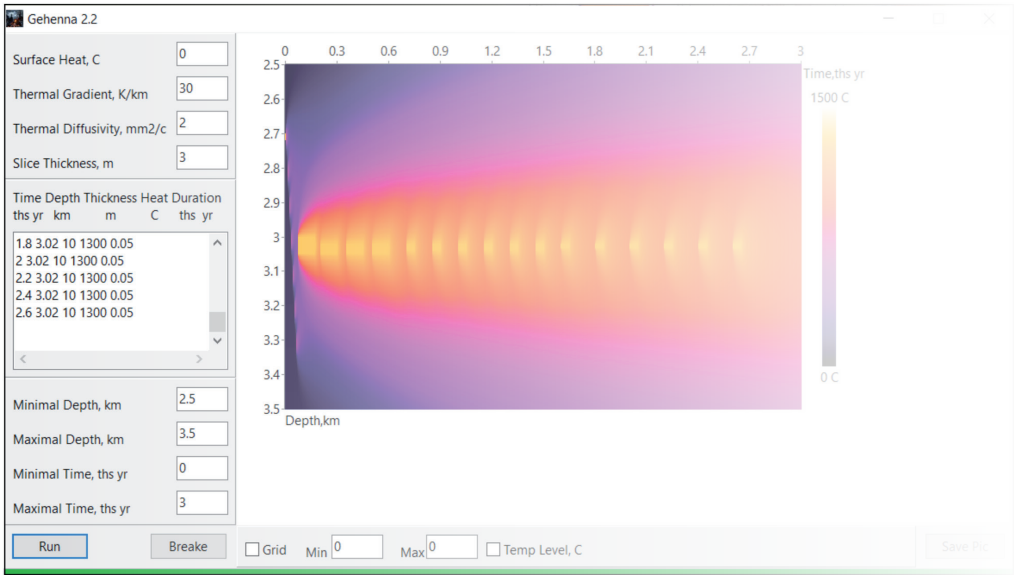


Рис. 1. Интерфейс программы Gehenna 2.2.
Fig. 1. Gehenna 2.2 interface.

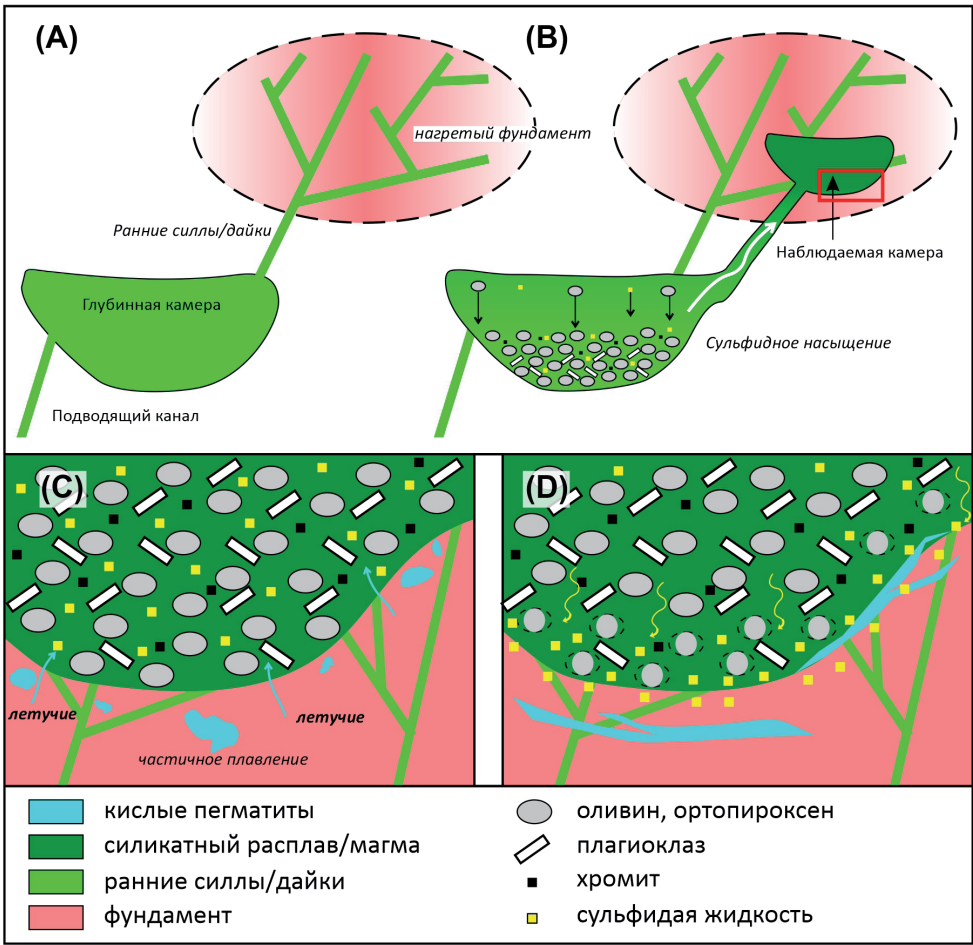


Рис. 2. Модель образования контактового сульфидного Cu-Ni-ЭПГ оруденения в МК. С изменениями по (Karykowski et al., 2018).
Fig. 2. Model of the formation of contact-style sulfide Cu-Ni-PGE mineralization in the Monchegorsk Complex. Modified after (Karykowski et al., 2018).

ПН обусловлен ранними магматическими импульсами. Для массивов Ниттис-Кумужья-Травяная и Нюд-Поаз (2504 ± 2 млн лет) это менее мощные магматические тела прединтрузивных даек и/или пород Дунитового блока (Amelin et al., 1995; Fedotov et al., 2009; Karykowski et al., 2018), а для массива Габбро-10 (2498 ± 6 млн лет) – породы соседнего массива Нюд-Поаз (Грошев и др., 2018; Грошев, Припачкин, 2018). 300°C принимается как температура ПН, которая в модели достигается в результате остывания серии силлов (рис. 3). Моделирование показывает, что зона частичного плавления фундамента с ПН достигает десятков метров, а без него практически отсутствует (рис. 3), что указывает на ключевое значение ПН для концентрирования сульфидной минерализации.

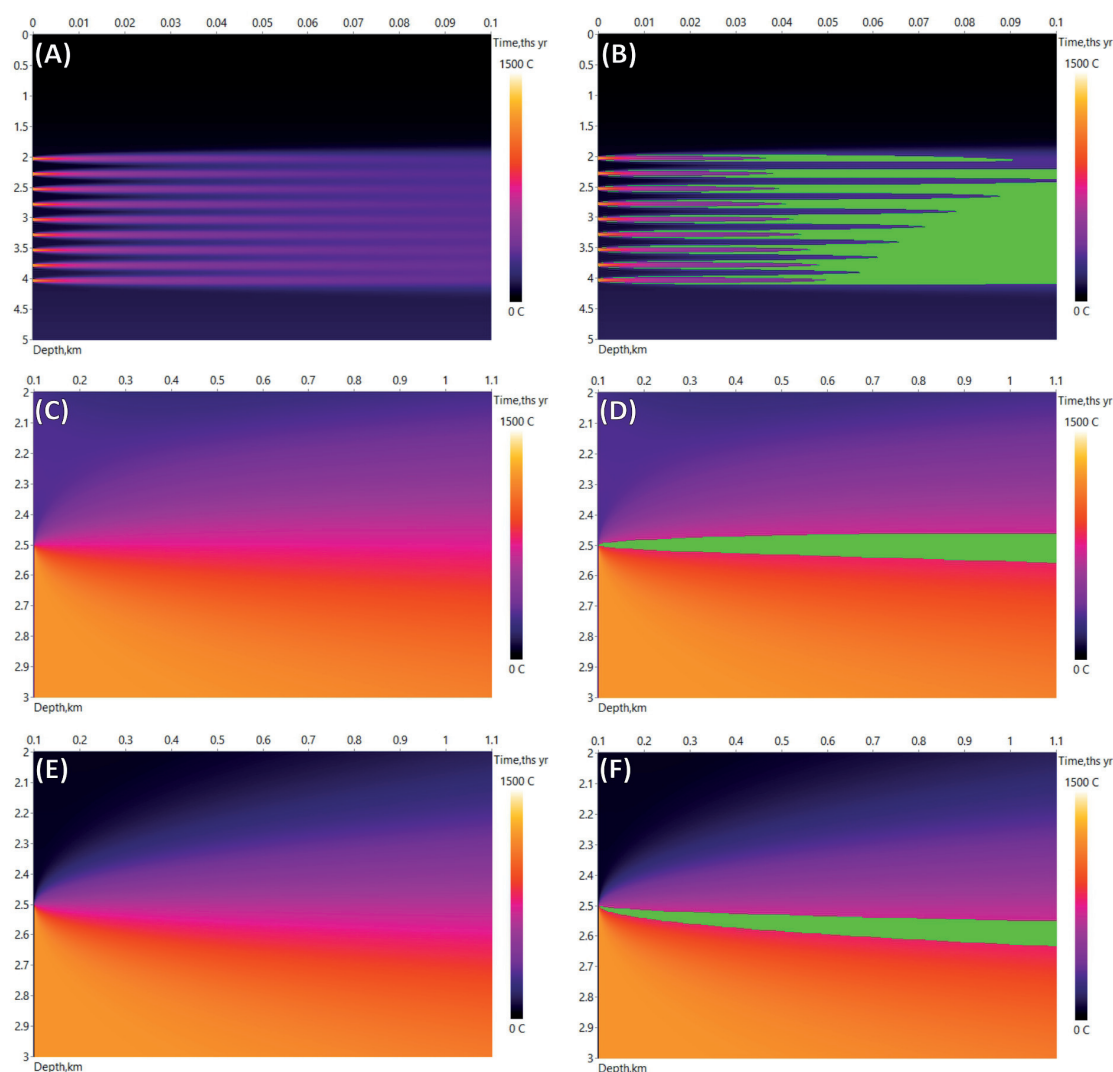


Рис. 3. Термограммы для различных сценариев внедрения массива НКТ. (А–В) Предварительный нагрев фундамента за счет внедрения серии силлов мощностью 50 м на расстоянии 250 м друг от друга. (С–Д) Внедрение кристаллической каши мощностью 1500 м в предварительно нагретый фундамент на глубине 2.5 км. (Е–Ф) Внедрение кристаллической каши мощностью 1500 м в холодный фундамент на глубине 2.5 км. Зеленым выделены диапазоны температур $300\text{--}400^\circ\text{C}$ (В) и $700\text{--}800^\circ\text{C}$ (D, F); температура магмы (кристаллической каши) 1200°C . Следует отметить, что зона значительного частичного плавления фундамента ($> 700^\circ\text{C}$) мощностью до 36 м возникает только в прогретом фундаменте.

Fig. 3. Thermograms for different emplacement scenarios of the NKT intrusion. (A–B) Preheating of the basement by a series of 50-m-thick sills spaced 250 m apart. (C–D) Emplacement of a 1500-m-thick crystal mush into preheated basement at a depth of 2.5 km. (E–F) Emplacement of a 1500-m-thick crystal mush at a depth of 2.5 km into cold basement. The temperature ranges $300\text{--}400^\circ\text{C}$ (B) and $700\text{--}800^\circ\text{C}$ (D, F) are highlighted in green; magma/crystal mush temperature is 1200°C . Note that a zone of significant partial melting ($> 700^\circ\text{C}$) with a thickness of up to 36 m occurs only in the preheated basement.

Изотопный U-Pb возраст пород ранних и поздних магматических импульсов с учетом точности метода не различается, несмотря на явные геологические свидетельства позднего образования, например, массива Габбро-10. Аккумуляция сульфидов вдоль нижнего контакта массива Габбро-10 указывает на то, что его магма внедрилась в прогретые вмещающие породы не позднее 100 тыс. лет после внедрения магмы Нюд-Поаз, когда температура в области нижнего контакта последнего была выше 300 °C (рис. 4).

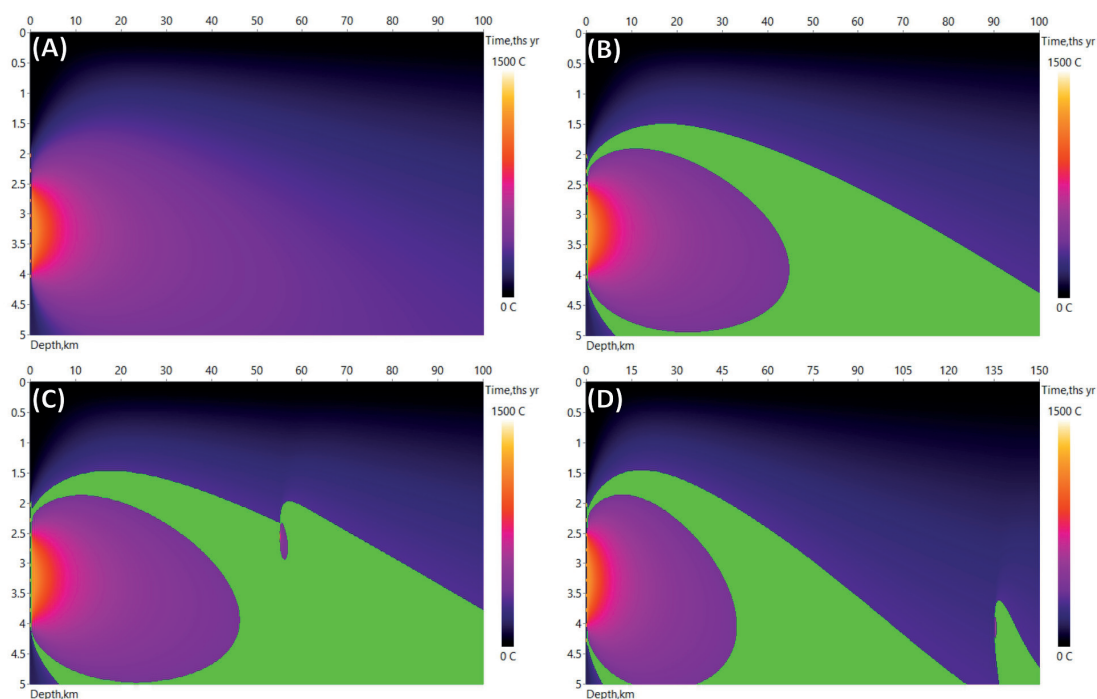


Рис. 4. Термограммы для различных сценариев внедрения массива Габбро-10. (А–В) Внедрение кристаллической каши ($T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) главной интрузивной фазы мощностью 1500 м в предварительно нагретый фундамент на глубине 2.5 км. (С–Д) Внедрение кристаллической каши поздней интрузивной фазы мощностью 50 м в верхний (С) или нижний «термальный контакт» (Д). Зеленым выделен диапазон температур 300–400 °C.

Fig. 4. Thermograms for different emplacement scenarios of the Gabbro-10 intrusion. (A–B) Emplacement of a 1500-m-thick main intrusive phase crystal mush ($T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) into a preheated basement at a depth of 2.5 km. (C–D) Emplacement of a 50-m-thick late intrusive phase crystal mush into the upper (C, favorable conditions the sulfide accumulation) or lower “thermal contact” (D, sulfides stay dispersed within the late phase). The temperature range 300–400 °C is highlighted in green.

Федорово-Панский комплекс

Вкрапленное сульфидное Cu-Ni-ЭПГ оруденение, аналогичное описанной минерализации МК, развито в западной части ФПК, на месторождении Федорова Тундра (Schissel et al., 2002; Groshev et al., 2019). Оруденение, как предполагается (Groshev et al., 2019 и ссылки там), связано с дополнительным магматическим импульсом (2485 ± 9 млн лет) и внедрено в уже остывший нижний контакт ранней интрузивной фазы массива Федорова (2526 ± 6 млн лет). Это подтверждается относительно равномерным распределением вкрапленных сульфидов внутри 300-метровой базальной рудной зоны. Термальное моделирование показывает (рис. 5), что рудоносная магма, изотопный возраст которой был дополнительно уточнен локальным методом по циркону (2491 ± 6 млн лет, проект РНФ № 22-27-20106), внедрилась через >650 тыс. лет, после остывания ранней интрузивной фазы ниже температуры ПН.

Норильский комплекс

Считается, что богатейшие залежи сульфидных руд в интрузивных траппах на севере Сибири сформировались в процессе длительного течения магмы, приведшего к формированию 100-метро-

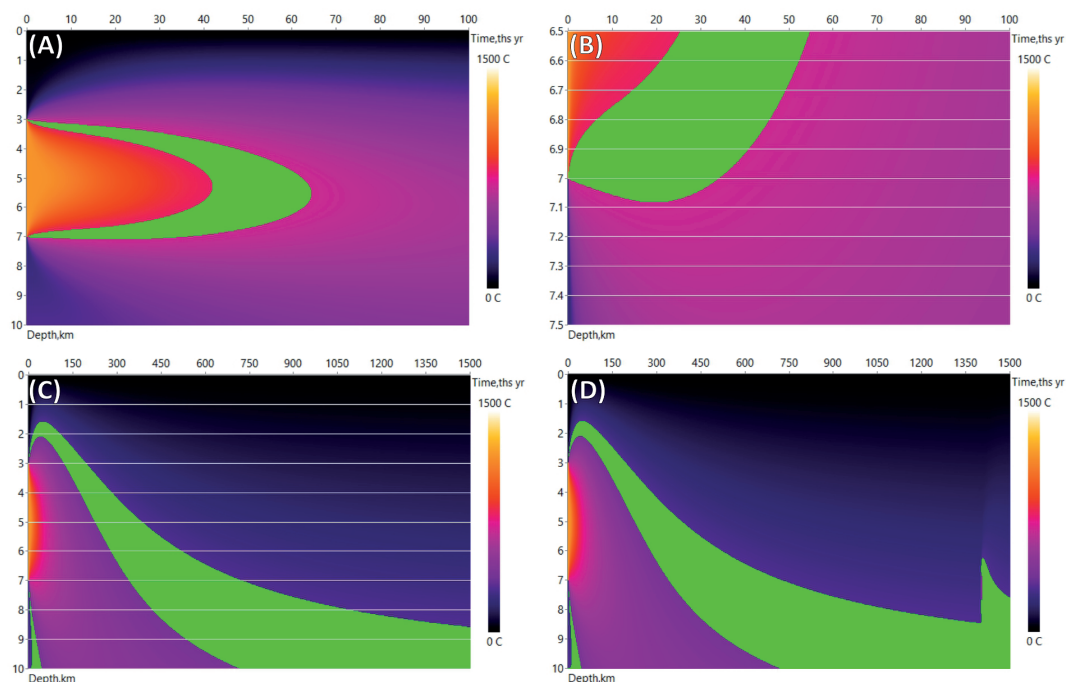


Рис. 5. Термограммы для двухфазного внедрения массива Федорова. (А) Внедрение кристаллической каши главной интрузивной фазы ($T=1200^{\circ}\text{C}$) мощностью 4000 м в холодный фундамент на глубине 3 км. (В) Температурный профиль $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$ в районе нижнего контакта главной фазы. Следует отметить, что зона частичного плавления пород фундамента составляет почти 100 м. (С) Скорость остывания фундамента, нагретого в результате внедрения главной фазы. (D) Внедрение кристаллической каши поздней интрузивной фазы мощностью 300 м в нижний контакт главной фазы. Зеленым выделены диапазоны температур $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$ (А–В) и $300\text{--}400^{\circ}\text{C}$ (С–D).

Fig. 5. Thermograms for the two-phase emplacement of the Fedorova intrusion. (A) Emplacement of crystal mush of the main intrusive 4000-m-thick phase ($T=1200^{\circ}\text{C}$) into a cold basement at a depth of 3 km. (B) Time-depth-temperature profile for $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$ in the area of the lower contact of the main phase. Noted that the zone of basement partial melting is almost 100-m-thick. (C) The rate of cooling of the basement heated as a result of the main phase emplacement. (D) Emplacement of the late 300-m-thick intrusive phase crystal mush at the lower contact of the main phase. The temperature ranges $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$ (A–B) and $300\text{--}400^{\circ}\text{C}$ (C–D) are highlighted in green.

вого ореола пироксеновых роговиков (температура кристаллизации 900°C) вокруг 200-метрового по мощности Хараелакского интрузива в НК (Туровцев, 2002; Налдретт, 2003; Радько, 2016). Наша оценка этой длительности составляет >1 тыс. лет при температуре магмы 1300°C внутри постепенно расширяющегося канала с начальной мощностью 50 м (рис. 6). Ниже предлагается возможный сценарий формирования Хараелакского интрузива.

Этап 1: ПН вмещающих пород. Для ПН используется последовательное, с интервалом 10 лет внедрение и остывание 7 силлов магмы мощностью 20 м и температурой 1300°C . Силлы располагаются через 100 м в интервале глубин 2.7–3.3 км (рис. 6, А). В результате образуется зона повышенных температур ($> 300^{\circ}\text{C}$), существующая в течение > 500 лет (рис. 6, В). Ввиду инициальной стадии траппового магматизма, во время которой внедрялись интрузии, ПН вмещающих пород важно учитывать, так как, во-первых, он оказывает влияние на размер итогового термального ореола, увеличивая его на первые десятки метров, и, во-вторых, как было показано выше, ПН является существенным фактором для формирования скоплений сульфидов на контактах интрузивов.

Этап 2: внедрение «периферического силла». Периферический силл, понимаемый как часть интрузии норильского типа, соединяющаяся с главным телом и не имеющая присущих главному телу петрографического разнообразия и скоплений массивных сульфидных руд, моделируется одномоментным внедрением магмы мощностью 50 м на глубине 3 км, которая начинает остывать сразу же после внедрения в области предварительного прогрева, не образуя контактового ореола за своими пределами (рис. 6, С). Это согласуется с нашими геологическими наблюдениями, ука-

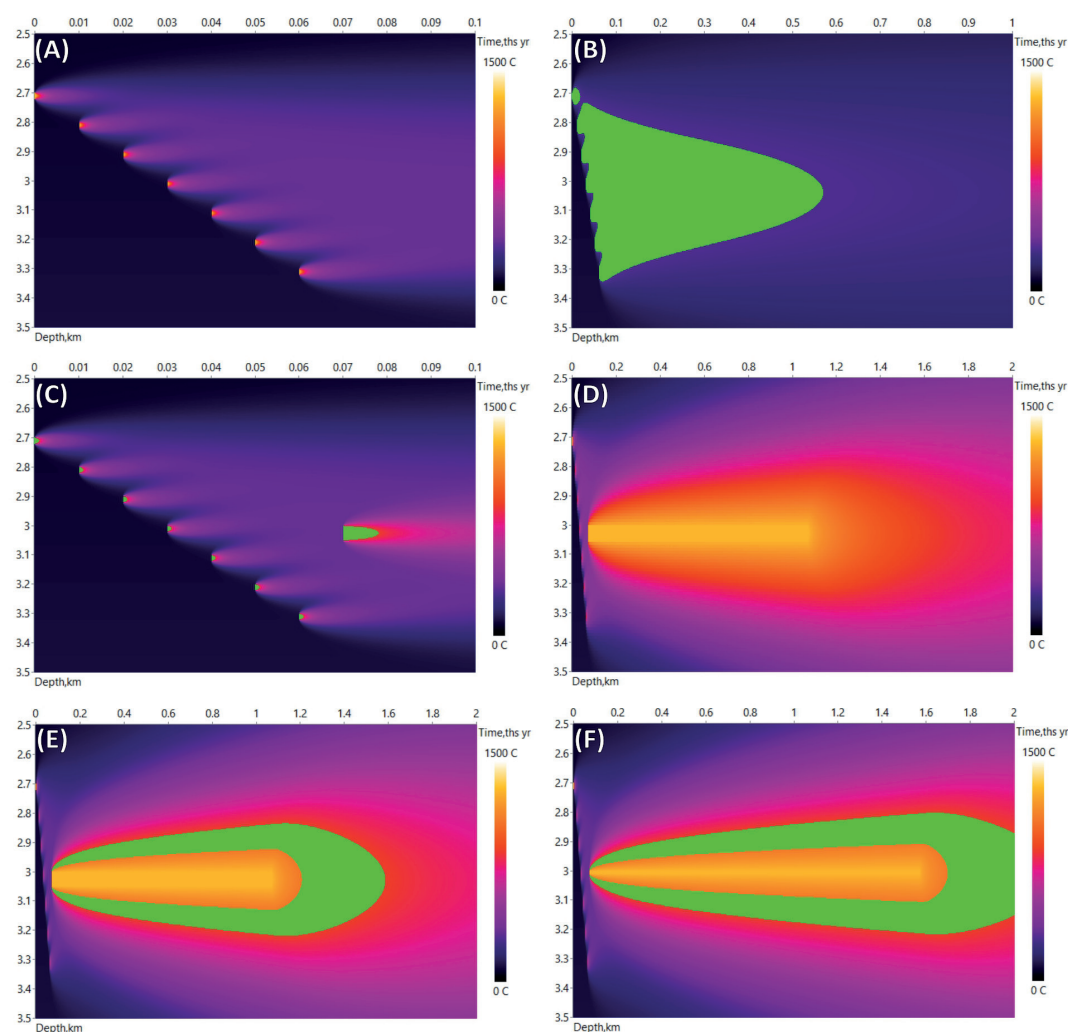


Рис. 6. Термограммы для различных этапов формирования норильских рудоносных интрузий. (А–В) Этап 1: последовательное внедрение серии силлов магмы мощностью 20 м и температурой 1300 °С в интервале глубин от 2.7 до 3.3 км. (С) Этап 2: внедрение силла магмы мощностью 50 м в предварительно прогретые вмещающие породы на глубине 3 км. (D–E) Этап 3: формирование «главного тела» и окружающего его контактового ореола за счет непрерывного протекания магмы с температурой 1300 °С внутри силла мощностью 50 м в течение 1000 лет. (F) То же, что и в варианте Е внутри силла мощностью 10 м в течение 1500 лет с результирующей мощностью интрузии 203 м и верхним ореолом роговиков 102 м. Зеленым выделена область с температурой более 300 °С (B), более 900 °С (C) и диапазон 900–1100 °С (E–F).

Fig. 6. Thermograms for different stages of the Norilsk ore-bearing intrusions formation. (A–B) Stage 1: successive emplacement of a series of magma 20-m-thick sills having temperature of 1300 °C at depths from 2.7 to 3.3 km. (C) Stage 2: intrusion of a 50 m thick magma sill into preheated country rocks at a depth of 3 km. (D–E) Stage 3: formation of the “main body” and surrounding contact aureole due to the continuous flow of magma with a temperature of 1300 °C inside a 50-m-thick sill for 1000 years. (F) Same as option E inside a 10-m-thick sill over 1500 years with a resulting intrusion thickness of 203 m and an upper hornfels halo of 102 m. The area in green is over 300 °C (B), over 900 °C (C) and within a range of 900–1100 °C (E–F).

зывающими на почти полное отсутствие контактовых изменений пород в периферических силлах, представленных, например, Южно-Норильской интрузией (Никулин и др., 2022).

Этап 3: формирование «главного тела». В соответствии с одним из сценариев формирования «главных тел» и ассоциирующих сульфидных руд, который предполагает прохождение через них объема магмы, на несколько порядков превосходящего их наблюдаемый объем (Налдретт, 2003), внедрение периферического силла усложняется длительным течением магмы внутри него. Протекание магмы с температурой 1300 °С внутри канала мощностью 50 м в течение одного года приводит, согласно расчётам, к формированию «зоны роговиков» ($T > 900\text{ °C}$) мощностью около 6 м, которая

со временем течения магмы увеличивается до 20 и 60 м за сроки 10 и 100 лет соответственно. В последнем случае с ростом ореола ороговикования будет происходить разрастание зоны полного плавления вмещающих пород, которая через 100 лет достигнет 30 м от первоначальных верхнего и нижнего контактов силла. Расплавленное и растворенное вещество вмещающих пород ($T > 1100^\circ\text{C}$) удаляется из главного тела за счет течения магмы, которая за 100 лет формирует канал мощностью 110 м с ореолами ороговикования по 30 м с каждой стороны интрузии. Дальнейшее непрерывное течение магмы приводит к расширению зоны контактовых изменений пород, которое сопровождается увеличением зоны плавления, а значит и мощности интрузии, что в конечном счете позволяет получить искомое соотношение мощности главного тела и ореола ороговикования. Например, за 1000 лет течения магмы образуется требуемый канал мощностью около 200 м и ореол вдвое меньшей мощности (рис. 6, D–E).

Принимая во внимание вертикальные размеры пород, которые с наибольшей вероятностью можно рассматривать как закристаллизованный поток (пикритовые габбродолериты, 10–20 м), стоит отметить, что мощность потока магмы внутри интрузивных тел, вероятно, была значительно меньше 50 м, как предполагается нашим первоначальным сценарием (рис. 6, E). Термограмма на рисунке 6, F показывает, что 10-метровый поток также способен сформировать «главное тело» и сопутствующий контактовый ореол пироксеновых роговиков, но за более длительное время – 1500 лет.

Заключение

На примерах МК, ФПК и НК показан потенциал термального моделирования, пригодного для выявления и иллюстрации ключевых процессов образования сульфидного оруденения в мафит-ультрамафитовых системах. Авторы далеки от мысли, что проведенное моделирование способно поставить решительную точку в многолетних дискуссиях о происхождении расслоенности и рудной минерализации в рассмотренных интрузивах. Однако, как нам представляется, такой подход и представленное программное обеспечение, благодаря своей простоте, могут быть полезны при разработке сценариев формирования как конкретных интрузивов или их участков, так и рудных районов в целом.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 22-27-20106,
<https://rscf.ru/project/22-27-20106/>.

Литература

1. Грошев Н.Ю., Припачкин П.В., Karykowski B.T., Малыгина А.В., Родионов Н.В., Беляцкий Б.В. Генезис магнетитового пласта массива Габбро-10, Мончегорский комплекс, Кольский регион: данные U-Pb SHRIMP-II датирования метадiorитов // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60. № 6. С. 546–557. DOI: 10.1134/S0016777018060023.
2. Грошев Н.Ю., Припачкин П.В. К вопросу о геологической позиции и платиноносности массива Габбро-10, Мончегорский комплекс, Кольский регион // Руды и металлы. 2018. № 4. С. 4–13. DOI: 10.24411/0869-5997-2018-10008
3. Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые месторождения. М.: Эслан, 2006. 496 с.
4. Налдретт А.Д. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2003. 487 с.
5. Никулин И.И., Михайлова Ю.А., Калашников А.О., Грошев Н.Ю., Степенщиков Д.Г., Пахомовский Я.А., Кадыров Р.И. Структурно-текстурные и вещественные свойства сульфидных медно-никелевых руд. ФИЦ КНЦ РАН, 2022. 82 с.
6. Радько В.А. Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 226 с.
7. Семенов В.С., Казанов О.В., Корнеев С.И., Сальникова Е.Б., Семенов С.В. Условия формирования расслоенных интрузий Мончегорского магматического узла // Петрология. 2022. Т. 30(4), С. 379–403. <https://doi.org/10.31857/S0869590322030074>.
8. Степенщиков Д.Г., Грошев Н.Ю. Программное приложение для термального моделирования интрузий // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. Т. 16. С. 565–567. <https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.115>.
9. Туровцев Д.М. Контактный метаморфизм норильских интрузий. М.: Науч. мир, 2002. 318 с.

10. Чашин В.В., Иванченко В.Н. Сульфидные ЭПГ-Cu-Ni и малосульфидные Pt-Pd руды Мончегорского рудного района (западный сектор Арктики): геологическая характеристика, минералого-геохимические и генетические особенности // Геология и геофизика. 2022. Т. 63(4). С. 622–650. <https://doi.org/10.15372/GiG2021184>.
11. Шарков Е.В., Чистяков А.В. Геолого-петрологические аспекты ЭПГ-Cu-Ni-оруденения в раннепалеопротерозойском Мончегорском расслоенном мафит-ультрамафитовом комплексе (Кольский полуостров) // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56(3). С. 171–194. <https://doi.org/10.7868/S0016777014030046>.
12. Amelin Y.V., Heaman L.M., Semenov V.S. U-Pb geochronology of layered mafic intrusions in the eastern Baltic Shield: implications for the timing and duration of Paleoproterozoic continental rifting // Precambrian Res. 1995. V. 75. P. 31–46. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00015-W](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00015-W).
13. Groshev N.Y., Rundkvist T.V., Karykowski B.T., Maier W.D., Korchagin A.U., Ivanov A.N., Junge M. Low-sulfide Platinum-palladium Deposits of the Paleoproterozoic Fedorova-Pana Layered Complex, Kola Region, Russia // Minerals. 2019. V. 9. 764. <https://doi.org/10.3390/min9120764>.
14. Fedotov Z.A., Serov P.A., Elizarov D.V. Tholeiites from the depleted subcontinental mantle in the root zone of the Monchegorsk pluton, Baltic Shield // Dokl. Earth Sci. 429. P. 1462–1466. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09090116/METRICS>.
15. Karykowski B.T., Maier W.D., Groshev N.Y., Barnes S.J., Pripachkin P.V., McDonald I., Savard D. Critical Controls on the Formation of Contact-Style PGE-Ni-Cu Mineralization: Evidence from the Paleoproterozoic Monchegorsk Complex, Kola Region, Russia // Econ. Geol. 2018. V. 113(4). P. 911–935. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4576>.
16. Schissel D., Tsvetkov A.A., Mitrofanov F.P., Korchagin A.U. Basal Platinum-Group Element Mineralization in the Federov Pansky Layered Mafic Intrusion, Kola Peninsula, Russia // Econ. Geol. V. 97. P. 1657–1677. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.8.1657>.