

УДК 551.242

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВОЗРАСТ КОЛЛИЗИОННОГО ЭТАПА МЕТАМОРФИЗМА БЛОКА ХАН-ХУХЕЙ (СЕВЕРНАЯ МОНГОЛИЯ)

© 2024 г. А. Н. Семенов*, О. П. Полянский, академик РАН В. В. Ревердатто

Поступило 01.03.2024 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принято к публикации 26.03.2024 г.

В статье приводится реконструкция раннепалеозойского коллизионного этапа метаморфизма блока Хан-Хухей (Сев. Монголия) на основе 3D-численного моделирования термического состояния коры и изотопного датирования. Впервые Sm/Nd-методом определён возраст гранат-биотитового сланца из метаморфического комплекса блока Хан-Хухей, который составил 517.4 ± 7.4 млн лет. Для сопоставления полученной оценки возраста метаморфизма с имеющимися определениями возраста (пост-)коллизионного гранитообразования в интервале 513–505 млн лет выполнено 3-мерное численное моделирование. В модели рассматривается в качестве причины плавления и формирования гранитоидных расплавов радиогенное нагревание при повышенном значении тепловыделения в породах утолщённой коры блока Хан-Хухей. Моделирование в трёхмерной постановке проведено впервые для термально-купольного типа метаморфизма. Результаты позволяют получить реалистичное представление о механизмах магмогенерации в типичных коллизионных обстановках при отсутствии мантийных магматических источников тепла. Временной интервал между метаморфизмом и этапом анатектического магмообразования составляет 5–12 млн лет.

Ключевые слова: метаморфизм, 3D-численное моделирование, гранитоидный магматизм, Sm–Nd-изотопное датирование, гнейс, метаморфический комплекс, Хан-Хухей

DOI: 10.31857/S2686739724080098

Характеристики этапов метаморфизма несут важную информацию для реконструкции общей геодинамической эволюции Сангиленского массива Тувино-Монгольского террейна. Реконструкция формы *PT*-тренда [1, 2] позволяет установить два этапа метаморфизма блока Хан-Хухей, относящегося к южной части Сангилена (Северная Монголия). Первый из них (M1) связан с коллизионным метаморфизмом с пиковыми параметрами 9 кбар/740°C, второй (M2) – с магматическим термальным событием, характеризующимся пиковыми параметрами 6–7 кбар/860–880°C. Посредством моделирования было показано, что параметры второго этапа могут быть достижимы только с участием магматического тепла высокотемпературной монцодиоритовой интрузии. Присутствие интрузивных тел кварцевых монцодиоритов, аналогичных по геохимии интрузивам Западного Сангилена (Тува), было обнаружено в пределах

метаморфических комплексов блока Хан-Хухей (рис. 1). Обнаруженные магматические тела рассматриваются в качестве апофиз глубинных интрузий, которые представляют вероятный тепловой источник этапа метаморфизма M2 в Хан-Хухейском и надёжно установлены Западно-Сангиленском блоке [3, 4]. Геохимические и петрологические характеристики комплекса Хан-Хухей позволяют установить сходство с метаморфическими породами Зап. Сангилена.

Однако ранее построенная модель метаморфизма Хан-Хухейского блока не объясняет возрастное соотношение коллизионного этапа метаморфизма M1 и магматического термального события M2. Для объяснения механизма мигматизации, плавления и формирования гранитоидных массивов нами было выполнено: а) 3D-численное моделирование теплового состояния коры, условий плавления и формирования гранитообразования в пределах Хан-Хухейского блока и б) определение возраста метаморфизма изотопным методом непосредственно по метаморфическим минералам.

Метод и параметры моделирования термо-тектонического режима. С целью реконструкции

Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия
*E-mail: semenov@igm.nsc.ru

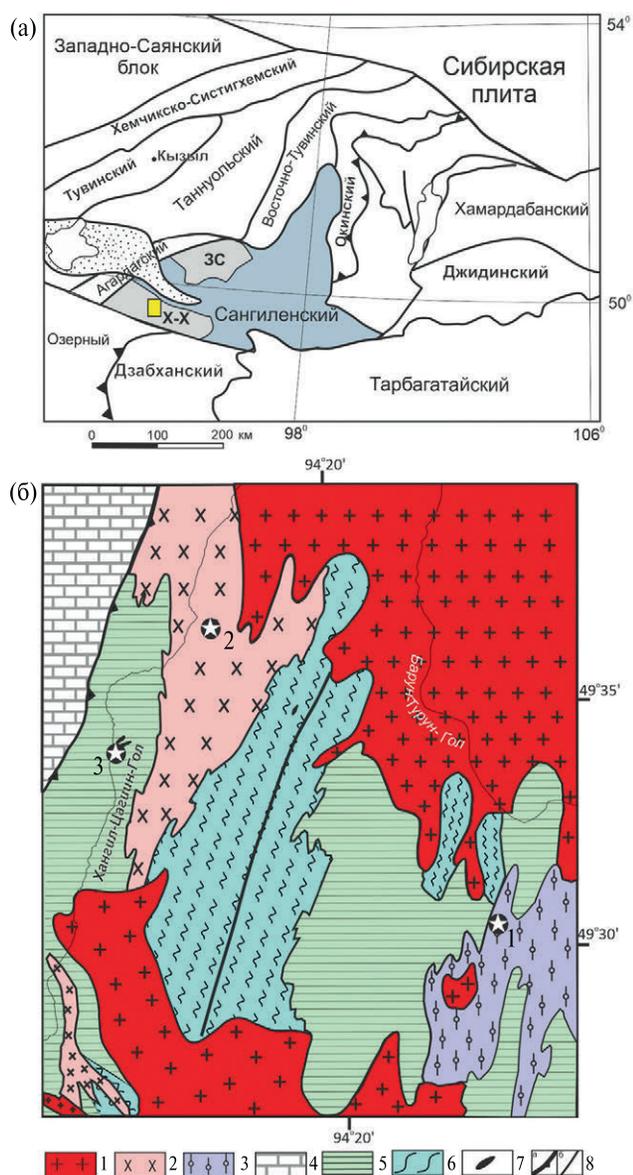


Рис. 1. (а) Структурно-тектоническая схема Северной Монголии и примыкающей части Алтае-Саянской области (составлена на основе [5–8]). Серым цветом показаны Западно-Сангиленский (ЗС) и Хан-Хухейский (Х-Х) метаморфические блоки в пределах Сангиленского массива. (б) Схема геологического строения метаморфического блока хр. Хан-Хухэй (Северная Монголия) в районе междуречья Хангил-Цагиин-Гол и Барун-Турун-Гол по [1]. 1 – постметаморфические гранодиориты, трондьемиты раннего палеозоя; 2 – синметаморфические гранодиориты; 3 – раннескладчатые биотитовые плагиогранодиориты; 4 – мраморизованные известняки с прослоями кварцитов балыктыгхемского комплекса; 5 – моренский комплекс нерасчленённый (гнейсы, амфиболиты, кварциты, сланцы, рассланцованные гранитоиды); 6 – эрзинский комплекс (биотитовые и гранат-биотитовые гнейсы с реликтами гиперстена); 7 – вне-масштабные тела монодиоритов; 8 – разломы: взбросы и надвиги (а), сдвиги (б). Точки определения возраста обозначены звёздами: 1, 2 (513 и 505 млн лет) – данные [1], 3 – 517.4 ± 7.4 млн лет, данная работа.

термального состояния коры в процессе формирования метаморфических комплексов блока Хан-Хухей выполнено 3D-термомеханическое моделирование. Рассмотрена 3-мерная модель теплового режима и магмогенерации в обстановке коллизии Агардагского (Таннуольского) островодужного блока и Тувино-Монгольского микроконтинента. Рассматривается строение блока Хан-Хухей, в котором аллохтон (балыктыгхемский и нарынский комплексы в схеме [1]) надвинут на автохтон (моренский и эрзинский комплексы).

Решение задачи проводилось с помощью программного комплекса ANSYS Fluent, основные уравнения и описание численного метода изложены в [9, 10]. Начальная геометрия модельной области, граничные условия и физические свойства для коры и мантии (рис. 2 а) подобраны соответствующими строению блока Хан-Хухей, показанному на рис. 1 б. Реологические свойства вещества земной коры определяются законом ползучести (крипа) влажного гранита в виде нелинейной зависимости эффективной вязкости от температуры и скорости деформации согласно [11]. Для мантии задавалась постоянная вязкость 10^{21} Па с [12]. Начальное распределение температуры соответствует граничным условиям при фиксированной температуре 850°C на глубине 65 км, 0°C на поверхности и теплоизолированным боковым границам. На рис. 2 б приведено начальное распределение в 2D-сечении в диапазоне температур $500\text{--}800^\circ\text{C}$. В утолщённом киле температура превышает 740°C , в самой глубокой области коры достигает 770°C . В коровых породах учитываются содержания радиационных источников тепла (U, Th, K), определённые гамма-спектрометрическим методом [2], с рассчитанным тепловыделением $A_1 = 1.5$ мкВт/м³ в автохтоне и $A_2 = 0.50$ мкВт/м³ в аллохтоне, величина которого в модели экспоненциально снижается с глубиной.

Учитывалась диаграмма плавления в гранитной коре с параметрами: температура солидуса/ликвидуса $730/930^\circ\text{C}$, скрытая теплота плавления 380 КДж/кг, задавалась линейная зависимость плотности магматической смеси кристаллов и расплава от доли расплава в интервале от 2700 до 2500 кг/м³ (солидус–ликвидус).

Результаты моделирования приведены в виде эволюционных картин, которые показывают форму поверхности солидуса (рис. 3) и распределение температуры в коре на моменты 5 и 10 млн лет после прекращения коллизии, что соответствует возрасту $\sim 510\text{--}500$ млн лет.

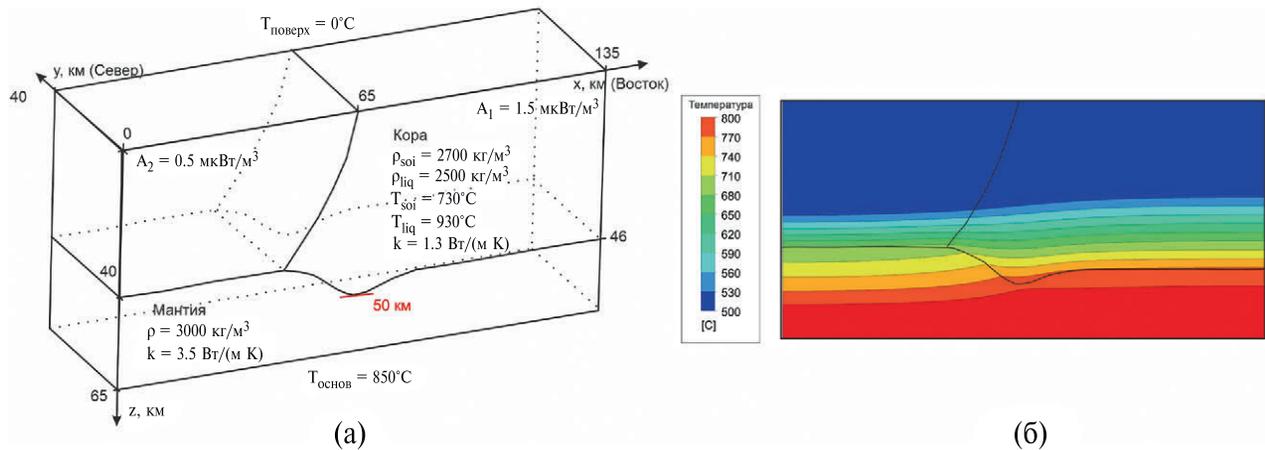


Рис. 2. Геометрия модельной области, граничные условия и физические свойства для коры и мантии (а) и начальное распределение температуры (б) в интервале 500–800°C (вне диапазона показана одним цветом). Ориентация осей у (Север) и х (Восток) соответствует географической. Поверхность взброса разделяет автохтон (Эрзинский и Моренский комплексы), восточный блок, и аллохтон (балыктыгхемский и нарынский комплексы), западный блок модели. Обозначение физических параметров см. в тексте.

Для визуализации движения расплава в коре удобно использовать картину распределения доли расплава в области плавления (в относительных единицах от 0 до 1 (полный расплав не достигается в расчётах)). На рис. 3 а–г приведена форма поверхности, соответствующей доле расплава 0.001, т.е. практически температуре солидуса. Таким образом эти контуры являются границами области плавления в коре.

За начальный момент (модельное время $t = 0$) в расчётах принят момент завершения коллизии на время 513 млн лет (Козаков и др., 2019) [1]. Плавление наступает в наиболее погруженном и нагретом слое коры. Процесс подъёма расплавленного корового материала, начинается при достижении доли расплава примерно 6–7%. Эти значения степени плавления гранитного вещества соответствуют реологическому порогу (объёмная доля расплава 6–8% согласно [13]), при превышении которого резко изменяется прочность частично расплавленного материала и расплав способен к сегрегации. Вертикальный подъём начинается в месте перехода от утолщённой коры к области автохтона с повышенной мощностью тепловыделения, это место является областью накопления расплава. Среднее время формирования диапиров, достигающих глубин 20–23 км примерно 7–8 млн лет. Менее крупные тела, всплывающие до глубин 30–35 км, формируются за 1–1.5 млн лет. В начальный момент образуется множество небольших очагов плавления, а затем расплав аккумулируется в нескольких обособленных, находящихся примерно на расстоянии 10–15 км друг от друга тел,

которые достигают глубин около 20 км. Средняя степень плавления в основании земной коры 10% при максимальных значениях 17%. Вертикальная скорость всплывания достигает 1.2×10^{-9} м/с = 3.5 см/год в момент начала подъёма вещества и замедляется по мере подъёма. Плавление было установлено только в области автохтонного блока, где возможно достижение температур 730°C и выше из-за разогрева утолщенной коры. Аномалии с повышенной температурой в области диапиров соседствуют с областями пониженной температуры вне диапиров по сравнению с обычным распределением в коре. На глубинах 23–25 км в ядре диапира температура достигает 750–760°C, головная часть имеет толщину 4–5 км, в диаметре до 15 км. В подпитывающем канале температура находится в диапазоне 760–770°C, ширина канала варьирует от 2.5 до 1.5 км, с периодическими локальными утолщениями и сужениями до 300 м. Также было установлено, что в канале присутствуют вертикальная и азимутальная скорость, что означает наличие вращения. Скорость вращения на порядок меньше, чем скорость подъёма и равна ~0.2 см/год.

Таким образом, если рассматривать радиоактивные элементы в качестве основного источника тепла, то следует ожидать, что между этапом коллизии/скупивания коры и этапом анатексиса и формирования мигматитов должен существовать некоторый период прогрева, разделяющий эти этапы.

Изотопное датирование возраста метаморфизма. Для Западно-Санленского блока по

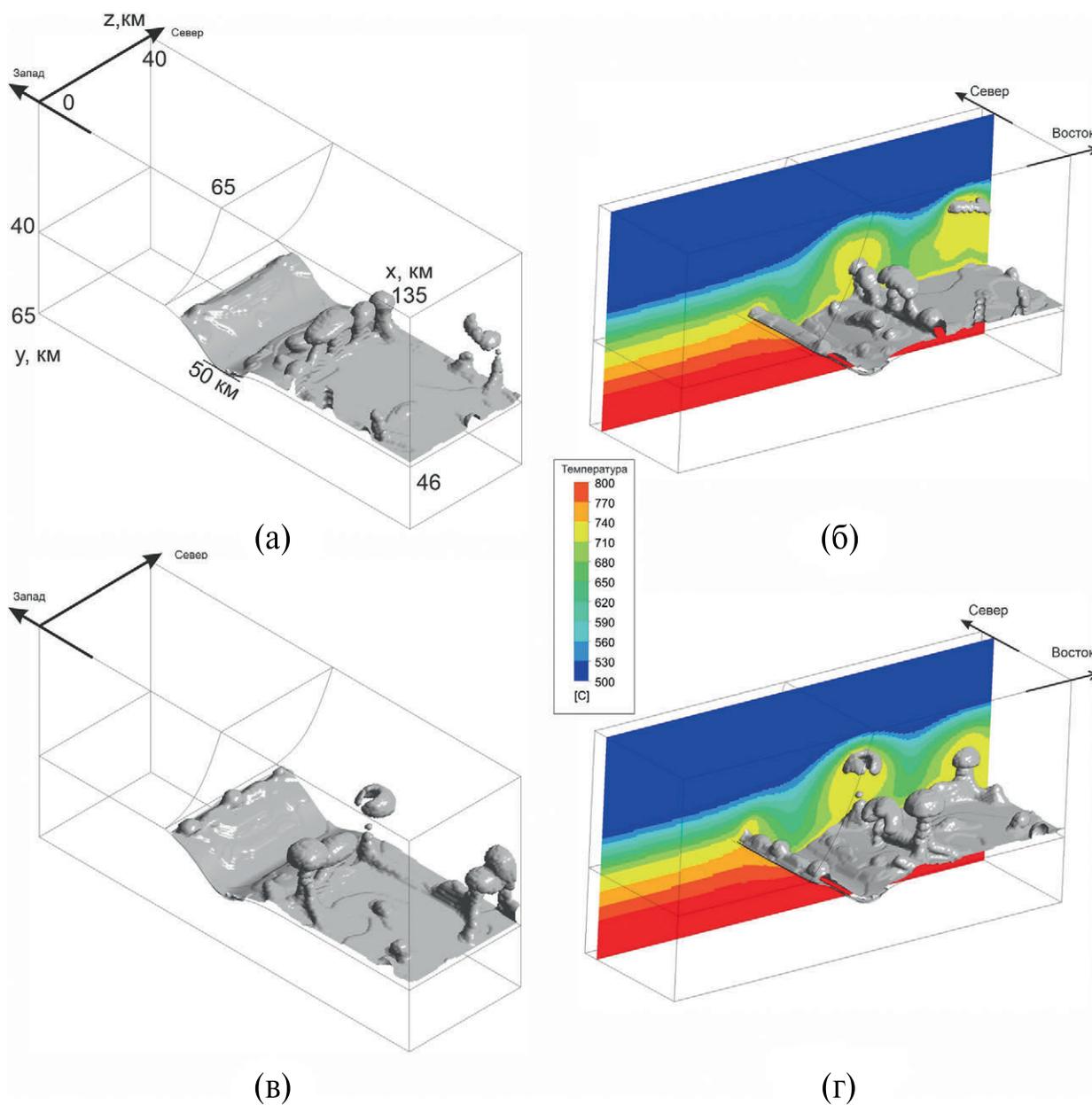


Рис. 3. Результаты расчёта, показывающие объёмное изображение поверхности солидуса (серая поверхность) и распределение температуры в продольном срезе (цветовая шкала в °С) на момент через 5 (а, б) и 10 млн лет (в, г) после прекращения коллизии (возраст соответствует ~510 и 505 млн лет). Точки обзора выбраны с целью более наглядного представления трёхмерной структуры физических полей.

данным [14] возраст гранат-кианитовых сланцев моренского комплекса, установленный U/Pb-методом по цирконам, составляет 515 млн лет и соответствует этапу метаморфизма M1. Ar–Ar-датирование Grt–St–Ky-сланцев M1 по амфиболу [15], температура закрытия изотопной системы которого соответствует нижним значениям температуры регионального метаморфизма, составляют 510 ± 5 млн лет. Менее детально установлены возрастные рубежи для

Ханхухейского блока: получено два определения возраста гранитоидных массивов: трондjemитового Барунтурунского с возрастом 513 ± 4 млн лет и гранодиоритового Хонгилцагинского с возрастом 505 ± 2 млн лет [1].

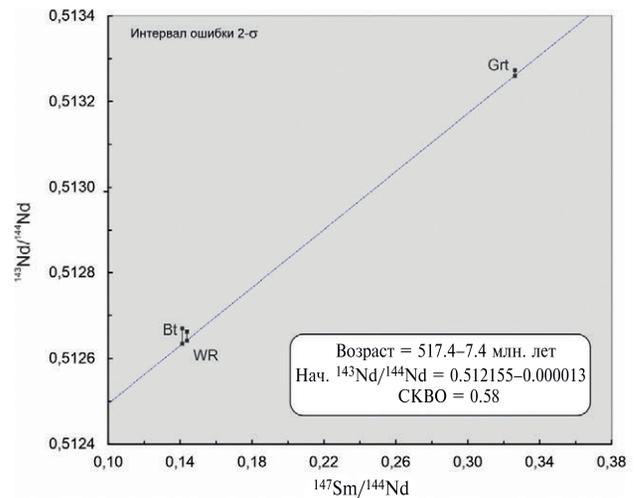
Исследование изотопной системы Sm–Nd было проведено в ЦКП “Геоаналитик” (ИГГ УрО РАН, Екатеринбург). Процедура химической подготовки образцов к определению концентраций и изотопного состава элементов

Таблица 1. Sm–Nd-изотопные данные для гранат-биотитовых сланцев Ханхухейского блока

Образец	Sm, ppm	Nd, ppm	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$
1905/2 _Grt	7.34	13.66	0.32508	0.00004	0.513255	0.000005
1905/2 _Bt	1.47	6.20	0.14318	0.00006	0.512640	0.000012
1905/2 _вал.проба	6.68	28.08	0.14376	0.00001	0.512648	0.000008

состояла из кислотного разложения проб (при 120°C) с добавлением изотопной метки ^{149}Sm - ^{150}Nd , хроматографического выделения суммы РЗЭ и разделения Sm, Nd на смоле LN-спес. Измерения изотопных отношений проводили методом ТИМС на спектрометре Triton Plus (Thermo) в статическом режиме. Правильность измерения Nd контролировалась измерением стандарта Nd JNdi-1(GSJ) в каждой партии образцов. Отношение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандарте во время работы составило 0.512112 ± 8 (2 SD, $N = 45$). Измеренные отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ нормализованы к $^{148}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.241572$. Точность определения концентраций Sm и Nd 1% (2 σ), изотопных отношений $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 0.3% (2 σ), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 0.0025% (2 σ). Методика описана в работе [16].

Был проанализирован образец X1905/2 из мезократовых тонкополосчатых гранолепидобластовых сланцев метаморфического этапа M1 [2]. Минеральный состав породы: Grt + Bt + Pl + Qtz \pm Kfs. Этап метаморфизма установлен на основании отсутствия в минеральной ассоциации силлиманита и кордиерита (типичных минералов M2 на Западном Сангилене [4]) и, в первую очередь, особенностей состава граната. Порфириобласты граната содержат включения кварца, плагиоклаза и биотита и характеризуются зональностью, указывающей на прогрессивный рост: по направлению от центра к краю, снижаются содержания CaO, MnO и возрастают FeO, MgO и Mg# (=Mg/(Mg+Mn+Fe)). Эти же минералы слагают породу. Был определён Sm–Nd-изотопный состав в монофракции граната, биотита и валовой пробе породы (табл. 1) и получен изохронный возраст 517.4 ± 7.4 млн лет (рис. 4). Данная оценка возраста метаморфизма в блоке Хан-Хухей хорошо согласуется с U–Pb-определением методом SIMS по циркону возраста метаморфизма M1 515.7 ± 6.9 млн лет в Западном Сангилене [14]. Полученная датировка означает, что формирование Барунтурунского и Хонгилцагинского гранитоидных массивов продолжалось в течение 5–10 млн лет после того, как была сформирована утолщённая кора в процессе коллизии. Таким образом, этап, включающий анатексис, мигматизацию и последующее

**Рис. 4.** Sm–Nd-изохрона для гранат-биотитового сланца блока Хан-Хухей. Grt, Bt, WR – гранат, биотит, валовая проба, соответственно.

формирование Хан-Хухейских гранитоидных массивов, длился не более 12 млн лет.

Оценки временного интервала между коллизией и кульминацией постколлизии гранитообразования сильно разнятся при изучении конкретных геологических структур и составляют до 15–25 млн лет (обзор работ см. в [17]). Вместе с тем, оценки длительности метаморфизма термально-купольного типа с последующим формированием синметаморфических анатектических гранитов в течение 4–10 млн лет сделаны для некоторых фанерозойских зонально-метаморфических поясов кианит-силлиманитового типа [18]. По-видимому, рассмотренный процесс формирования гранитоидов блока Хан-Хухей является примером более короткого интервала между коллизией и анатектическим гранитообразованием, чем это представлялось ранее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведено моделирование плавления и магмообразования в трёхмерной постановке на примере коллизии-метаморфических комплексов в коре Сангиленского террейна. Результаты позволяют получить реалистичное

представление о механизмах магмогенерации и метаморфизма в коллизионной обстановке дуга–микроконтинент при отсутствии мантийных магматических источников тепла.

Впервые для метаморфических пород блока Хан-Хухей (южная часть Сангиленского массива) Sm–Nd-методом определён возраст метаморфизма 517.4 ± 7.4 млн лет, хорошо согласующийся с имеющимися определениями возраста коллизионного гранитообразования в интервале 513–505 млн лет.

Установлен временной интервал 5–12 млн лет между завершением коллизионного метаморфизма в процессе утолщения коры при повышении содержания радиогенных источников тепла и формированием анатектических гранитоидов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Н.Г. Солошенко (ЦКП “Геоаналитик”, ИГГ УрО РАН, Екатеринбург) за выполненные изотопные исследования, анонимному рецензенту – за ценные конструктивные замечания.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-77-00068, <https://rscf.ru/project/22-77-00068/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козаков И. К., Сальникова Е. Б., Анисимова И. В. и др. Тектоническая позиция метаморфических поясов позднего неопротерозоя–раннего палеозоя в структуре Тувино-Монгольского террейна Центрально-Азиатского складчатого пояса // Петрология. 2019. Т. 27. № 1. С. 47–64. doi: 10.31857/S0869-59032747-64.
2. Полянский О. П., Селятицкий А. Ю., Зиновьев С. В., Бабичев А. В. Тектонотермальная раннепалеозойская эволюция блока Хан-Хухей (Северная Монголия) // Петрология. 2023, Т. 31. № 5. С. 510–530. DOI: 10.31857/S0869590323050047.
3. Шелепаев Р. А., Егорова В. В., Изох А. Э., Зельтман Р. Коллизионный базитовый магматизм складчатого обрамления юга Сибири (Западный Сангилен, Юго-Восточная Тува) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 5. С. 653–672.
4. Селятицкий А. Ю., Полянский О. П., Шелепаев Р. А. Глубинный контактово-метаморфический ореол Баянкольского габбро-монциодiorитового массива – индикатор нижнекоровых базитовых камер (Западный Сангилен, Ю–В Тува) // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 9. С. 1204–1226.
5. Геологическая карта Республики Тыва (СФО). 2002. По материалам Госгеолкарта-1000 и Госгеолкарта-200 (Отв. исп. Струнин Б.М). URL: <https://webmapget.vsegei.ru/index.html>
6. Badarch G., Cunningham W. D., Windley B. F. A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia // Journal of Asian Earth Sciences. 2002. V. 21. P. 87–110.
7. Кузьмичев А. Б. Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. М.: ПРОБЕЛ-2000, 2004. 192 с.
8. Ярмолюк В. В., Дегтярев К. Е. Докембрийские террейны Центрально-Азиатского орогенного пояса: сравнительная характеристика, типизация и особенности тектонической эволюции // Геотектоника. 2019. № 1. С. 3–43.
9. Семенов А. Н., Полянский О. П. Численное моделирование механизмов минглинга и миксинга магмы на примере формирования сложных интрузивов // Геология и геофизика, 2017. Т. 58. № 11. С. 1664–1683.
10. Полянский О. П., Изох А. Э., Семенов А. Н. и др. Термомеханическое моделирование формирования многокамерных интрузий для выявления связи плутонометаморфизма с габбро-диоритовыми массивами Западного Сангилена, Тува, Россия // Геотектоника. 2021. № 1. С. 1–21.
11. Ranally G. Rheology of the Earth. London, Chapman & Hall, 1995. 413 p.
12. Тёркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред. Ч. 2. М.: Мир, 1985. 360 с.
13. Rosenberg C. L., Handy M. R. // J. Metamorphic Geol. 2005. V. 23 (1), P. 19–28. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2005.00555.x>
14. Гибшер А. С., Гибшер А. А., Мальковец В. Г. и др. Природа и возраст высокобарического (кианитового) метаморфизма Западного Сангилена (юго-восточная Тува) // Геодинамические обстановки и термодинамические условия регионального метаморфизма в докембрии и фанерозое / Материалы V Российской конференция по проблемам геологии и геодинамики докембрия, Санкт-Петербург, ИГГД РАН. СПб.: Sprinter, 2017. С. 52–53.
15. Травин А. В. Термохронология раннепалеозойских коллизионных, субдукционно-коллизионных структур Центральной Азии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3. С. 553–574.

16. Аникина Е. В., Малич К. Н., Белоусова Е. А., Бадалина И. Ю., Солошенко Н. Г., Русин И. А., Алексеев А. В. U-Pb возраст и Hf-Nd-Sr изотопная систематика жильных пород Волковского массива (Средний Урал, Россия) // *Геохимия*. 2018. № 3. С. 209–221.
17. Верниковский В. А., Полянский О. П., Бабичев А. В., Верниковская А. Е., Прокурнин В. Ф., Матушкин Н. Ю. Тектонотермальная модель для позднепалеозойского синколлизийного этапа формирования Карского орогена (Северный Таймыр, Центральная Арктика) // *Геология и геофизика*. 2022. Т. 63. № 4. С. 440–457.
18. Кориковский С. П. Контрастные модели проградно-ретроградной эволюции метаморфизма фанерозойских складчатых поясов в зонах коллизии и субдукции // *Петрология*. 1995. Т. 3 (1). С. 45–63.

3D MODELING AND AGE OF THE COLLISION METAMORPHISM OF THE KHAN-KHUKHEI BLOCK, NORTHERN MONGOLIA

A. N. Semenov[#], O. P. Polyansky, Academician of the RAS V. V. Reverdatto

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

[#]*E-mail: semenov@igm.nsc.ru*

The reconstruction of the Early Paleozoic collision metamorphism of the Khan-Khukhei Block (Northern Mongolia) based on 3D modeling of thermal state of the crust and isotope dating is presented. The age of garnet-biotite schist from a metamorphic complex of the Khan-Khukhei Block of 517.4 ± 7.4 Ma is determined for the first time. 3D modeling was conducted to compare this age of metamorphism with the available age determinations of (post-)collision granite formation in the range of 513–505 Ma. The model considers radiogenic heating at an increased value of heat release in the rocks of the thickened crust of the Khan-Khukhei block as the cause of the migmatization and formation of granitoid melts. Three-dimensional modeling was carried out for the first time for the thermal-dome type of metamorphism. The results provide a realistic conception of magma generation in typical collision settings in the absence of mantle magmatic heat sources. The time interval between metamorphism and the stage of anatectic magma formation is 5–12 million years.

Keywords: metamorphism, 3D numerical modeling, granitoid magmatism, Sm-Nd isotope dating, gneiss, metamorphic complex, Khan-Khukhey