

А

**СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА**

Основан в январе 1960	Периодичность 12 раз в год	Том 56, № 6	Июнь 2015
--------------------------	-------------------------------	-------------	--------------

**СОДЕРЖАНИЕ**

*ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ*

- Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Зиновьев С.В., Хиллер В.В.**  
*P-T-t* реконструкции метаморфической истории южной части Енисейского кряжа  
(Сибирский кратон): петрологические следствия и связь с суперконтинентальными  
циклами ..... 1031
- Крупчатников В.И., Врублевский В.В., Крук Н.Н.** Раннемезозойские лампроиты  
и монцонитоиды юго-востока Горного Алтая: геохимия, Sr-Nd изотопный состав,  
источники расплавов ..... 1057
- Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л., Толстов А.В., Щербов Б.Л.,  
Карманов Н.С., Герасимов Е.Ю., Брянская А.В.** Главные рудообразующие  
минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (*Арктическая Сибирь*) ..... 1080
- Туркина О.М., Сухоруков В.П.** Раннедокембрийские высокометаморфизованные  
терригенные породы гранулитогнейсовых блоков Шарыжалгайского выступа  
(*юго-запад Сибирского кратона*) ..... 1116
- Персиков Э.С., Бухтияров П.Г., Сокол А.Г.** Изменение вязкости кимберлитовых  
и базальтовых магм в процессах их зарождения и эволюции (*прогноз*) ..... 1131
- Лаптев Ю.В.** Реконструкции физико-химических условий сульфидообразования для  
гидротермальных систем Краснов и Ашадзе (*Срединно-Атлантический хребет*) ..... 1141
- Рябуха М.А., Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Бульбак Т.А., Хоменко М.О.,  
Сазонов А.М.** РТХ-параметры метаморфогенных и гидротермальных флюидов:  
изотопия и возраст формирования Богунайского золоторудного месторождения  
южной части Енисейского кряжа (*Россия*) ..... 1153

*СЕДИМЕНТОЛОГИЯ, БИОСТРАТИГРАФИЯ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ*

- Сараев С.В.** Литолого-фациальная характеристика усольской свиты (*нижний кембрий*)  
и ее возрастных аналогов Предъенисейского осадочного бассейна  
Западной Сибири ..... 1173
- Левчук Л.К., Никитенко Б.Л., Меледина С.В.** Биостратиграфия келловей и верхней юры  
Шаимского района (*Западная Сибирь*) по фораминиферам и аммонитам ..... 1189
- Авраменко А.С., Черепанова М.В., Пушкарь В.С., Ярусова С.Б.** Характеристика  
некоторых дальневосточных диатомитов ..... 1206

*НЕКРОЛОГ*

- Занин Юрий Николаевич (1930—2015)** ..... 1221

SIBERIAN BRANCH  
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
SCIENTIFIC JOURNAL  
GEOLOGIYA I GEOFIZIKA

Founded in January 1960	Monthly	Vol. 56, № 6	June 2015
----------------------------	---------	--------------	--------------

## CONTENTS

### PETROLOGY, GEOCHEMISTRY, AND MINERALOGY

- Likhanov I.I., Reverdatto V.V., Kozlov P.S., Zinoviev S.V., and Khiller V.V.** *P-T-t* reconstructions of South Yenisei Ridge metamorphic history (*Siberian craton*): petrological consequences and application to the supercontinental sysles ..... 1031
- Krupchatnikov V.I., Vrublevskii V.V., and Kruk N.N.** Early Mesozoic lamproites and monzonitoids of southeastern Gorny Altai: geochemistry, Sr–Nd isotope composition, and sources of melts ..... 1057
- Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Dobretsov N.L., Tolstov A.V., Shcherbov B.L., Karmanov N.S., Gerasimov E.Yu., and Bryanskaya A.V.** Major minerals of abnormally high-grade ores of the Tomtor deposit (*Arctic Siberia*)..... 1080
- Turkina O.M. and Sukhorukov V.P.** Early Precambrian high-grade metamorphosed terrigenous rocks of granulite–gneiss terranes of the Sharyzhalgai uplift (*southwestern Siberian craton*)..... 1116
- Persikov E.S., Bukhtiyarov P.G., and Sokol A.G.** Change in the viscosity of kimberlite and basaltic magmas during their origin and evolution (*prediction*) ..... 1131
- Laptev Yu.V.** Computer reconstruction of the physicochemical conditions of sulfide formation for the Krasnov and Ashadze hydrothermal systems (*Mid-Atlantic Ridge*)..... 1141
- Ryabukha M.A., Gibsher N.A., Tomilenko A.A., Bul’bak T.A., Khomenko M.O., and Sazonov A.M.** *P-T-X* parameters of metamorphogene and hydrothermal fluids, isotopy and age of the Bogunai gold deposit, southern Yenisei Ridge (*Russia*) ..... 1153

### SEDIMENTOLOGY, BIOSTRATIGRAPHY, AND PALEOGEOGRAPHY

- Saraev S.V.** Lithologic and facies characteristics of the Lower Cambrian Usolka Formation and its age analogs in the Cis-Yenisei sedimentary basin, West Siberia ..... 1173
- Levchuk L.K., Nikitenko B.L., and Meledina S.V.** Callovian and Upper Jurassic foraminiferal and ammonite biostratigraphy of the Shaim petroleum region (*West Siberia*) ..... 1189
- Avramenko A.S., Cherepanova M.V., Pushkar’ V.S., and Yarusova S.B.** Diatom characteristics of the Far East siliceous organogenic deposits..... 1206

### OBITUARY

- Zanin Yurii Nikolaevich (1930—2015)** ..... 1221

SIBERIAN BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
NOVOSIBIRSK

© Сибирское отделение РАН, 2015  
© ИГМ СО РАН, 2015  
© ИНГГ СО РАН, 2015

***P-T-t* РЕКОНСТРУКЦИИ МЕТАМОРФИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ ЮЖНОЙ ЧАСТИ  
ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА (Сибирский кратон): ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ  
И СВЯЗЬ С СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНЫМИ ЦИКЛАМИ**

**И.И. Лиханов<sup>1</sup>, В.В. Ревердатто<sup>1</sup>, П.С. Козлов<sup>2</sup>, С.В. Зиновьев<sup>1,3</sup>, В.В. Хиллер<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620151, Екатеринбург, Почтовый пер., 7, Россия

<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

На основании изучения гнейсов Приенисейской региональной сдвиговой зоны (ПРСЗ) получены первые данные о проявлении мезопротерозойских тектонических событий в геологической истории Южно-Енисейского кряжа и выделено несколько этапов деформационно-метаморфических преобразований в интервале от позднего палеопротерозоя до венда.

Первый этап (~1.73 млрд лет), соответствующий времени проявления гранулит-амфиболитового метаморфизма пород при  $P = 5.9$  кбар и  $T = 635$  °C, фиксирует завершение становления структуры Сибирского кратона в составе суперконтинента Нуна.

На втором этапе в результате растяжения коры, отвечающего предполагаемому распаду Нуны, эти породы подверглись динамометаморфизму ( $P = 7.4$  кбар и  $T = 660$  °C) с тремя пиками 1.54, 1.38 и 1.25 млрд лет с образованием комплексов высокobarических бластомилонитов. Поздние деформации мезопротерозойской тектонической активизации в регионе были связаны с коллизионными процессами гренвилльского возраста (1.17—1.03 млрд лет), ответственными за формирование суперконтинента Родиния.

Заключительные импульсы динамометаморфических структурно-вещественных преобразований (615—600 млн лет), связанные с аккрецией островодужных террейнов к западной окраине Сибирского кратона, маркируют время завершающего этапа неопротерозойской эволюции Енисейского кряжа. Общая продолжительность выявленных процессов в рифейской эволюции Южно-Енисейского кряжа (~650 млн лет) коррелируется с длительностью геодинамических циклов в развитии суперконтинентов. Схожая последовательность однотипных тектонотермальных событий в истории развития Южно- и Северо-Енисейского кряжа указывают на их синхронное развитие в составе единой структуры в широком диапазоне времени (1385—600 млн лет).

Новые сведения о проявлении разновозрастных событий на западной окраине Сибирского кратона не согласуются с гипотезой о существовании глобального перерыва (от 1.75 до 0.7 млрд лет) в эндогенной активности докембрийского этапа тектонической эволюции юго-западной окраины Сибирского кратона. Синхронная последовательность тектонотермальных событий, выявленная по периферии крупных докембрийских кратонов Лаврентии, Балтики и Сибири, указывает на их территориальную близость в широком диапазоне времени (1550—600 млн лет). Это согласуется с современными палеомагнитными реконструкциями, подтверждающими, что эти кратоны являлись ядрами суперконтинентов Нуна и Родиния в указанном интервале времени.

*Метаморфизм, деформации, геотермобарометрия, Th-U-Pb датирование монацита, Енисейский кряж, Сибирский кратон, суперконтиненты Нуна и Родиния.*

***P-T-t* RECONSTRUCTIONS OF SOUTH YENISEI RIDGE METAMORPHIC HISTORY  
(Siberian craton): PETROLOGICAL CONSEQUENCES AND APPLICATION  
TO THE SUPERCONTINENTAL CYCLES**

**I.I. Likhanov, V.V. Reverdatto, P.S. Kozlov, S.V. Zinoviev, and V.V. Khiller**

Studies of gneisses from the Yenisei regional shear zone (YRSZ) provide the first evidence for Mesoproterozoic tectonic events in the geologic history of the South Yenisei Ridge and allowed the recognition of several stages of deformation and metamorphism spanning from Late Paleoproterozoic to Vendian. The first stage (~1.73 Ga), corresponding to the period of granulite–amphibolite metamorphism at  $P = 5.9$  kbar and  $T =$

635 °C, marks the final amalgamation of the Siberian craton to the Paleo-Mesoproterozoic Nuna supercontinent. During the second stage, corresponding to a hypothesized breakup of Nuna as a result of crustal extension, these rocks underwent Mesoproterozoic dynamic metamorphism ( $P = 7.4$  kbar and  $T = 660$  °C) with three peaks at 1.54, 1.38, and 1.25 Ga and the formation of high-pressure blastomylonite rocks in shear zones. Late-stage deformations during the Mesoproterozoic tectonic activity in the region, related to the Grenville-age collision processes and assembly of Rodinia, took place at 1.17–1.03 Ga. The latest pulse of dynamic metamorphism (615–600 Ma) marks the final stage of the Neoproterozoic evolution of the Yenisei Ridge, which is associated with the accretion of island-arc terranes to the western margin of the Siberian craton. The overall duration of identified tectonothermal processes within the South Yenisei Ridge during the Riphean (~650 Ma) is correlated with the duration of geodynamic cycles in the supercontinent evolution. A similar succession and style of tectonothermal events in the history of both the southern and the northern parts of the Yenisei Ridge suggest that they evolved synchronously within a single structure over a prolonged time span (1385–600 Ma). New data on coeavl events identified on the western margin of the Siberian craton contradict the hypothesis of a mantle activity lull (from 1.75 to 0.7 Ga) on the southwestern margins of the Siberian craton during the Precambrian. The synchronous sequence and similar style of tectonic events on the periphery of the large Precambrian Laurentia, Baltica, and Siberia cratons suggest their spatial proximity over a prolonged time span (1550–600 Ma). The above conclusion is consistent with the results of modern paleomagnetic reconstructions suggesting that these cratons represented the cores of Nuna and Rodinia within the above time interval.

*Metamorphism, deformations, geothermobarometry, Th-U-Pb monazite dating, Yenisei Ridge, Siberian craton, Nuna and Rodinia supercontinents*

## ВВЕДЕНИЕ

Южно-Енисейский кряж (Ангаро-Канский блок) занимает центральную часть протерозойского Ангарского складчатого пояса, протягивающегося от Таймыра до Шарыжалгайского выступа (Точерский разлом) в Прибайкалье, в пределах юго-западной окраины Сибирского кратона. Эта область считается краевым выступом фундамента платформы и включает в себя аналоги практически всех метаморфических и магматических комплексов пояса [Ножкин, 1999]. Тесная ассоциация разнообразных породных комплексов свидетельствует о весьма сложном строении. Поэтому реконструкция его геологической истории важна не только для понимания тектонической эволюции подвижных поясов континентальных окраин, но и для решения вопроса о вхождении Сибирского кратона в состав древних суперконтинентов Нуна и Родиния [Pisarevsky et al., 2008b; Хаин, 2010; Добрецов и др., 2013].

Считается, что этот период эволюции Земли, включающий огромный временной интервал (1.75—0.65 млрд лет), отличается низкой эндогенной активностью в связи с перестройкой конвективных течений и плюмов в мантии [Maruyama et al., 2007]. На этих представлениях базируются современные реконструкции развития юго-западной окраины Сибирского кратона [Гладкочуб и др., 2008]. Об этом же свидетельствует отсутствие на Южно-Енисейском кряже значимых эндогенных событий со времени внедрения гранитоидов таракского комплекса с возрастом 1900—1750 млн лет [Ножкин, 1999; Ножкин и др., 2003, 2009; Туркина и др., 2007, 2012], прорывающих палеопротерозойские гранулитов- и амфиболитогнейсовые комплексы Ангаро-Канского литосферного блока, до венда (628—638 млн лет — U-Pb по цирконам из метариолитов и плагиогранитов Предивинского террейна) [Vernikovskiy et al., 2003]. Мы полагаем, что существование такого глобального по продолжительности перерыва, охватывающего весь рифей, в докембрийской истории региона связано с недостатком возрастных данных и неоднозначностью палеорекострукций местоположения отдельных кратонов. В последние годы нами получен ряд прецизионных датировок по мезо- и неопротерозойской эволюции Северо-Енисейского кряжа, являющихся свидетельствами проявления процессов распада суперконтинента Нуна [Попов и др., 2010; Лиханов и др., 2012a] и событий гренвильского возраста [Лиханов и др., 2007, 2010, 2011б,в, 2012б,в, 2013г; Ножкин и др., 2011; Козлов и др., 2012; Лиханов, Ревердатто, 2014а,б; Nozhkin et al., 2013] с последующим растяжением земной коры и рифтогенезом [Ножкин и др., 2007а, 2008, 2011, 2013; Лиханов и др., 2013б,в,г,д, 2014а], в результате которых был собран и затем распался суперконтинент Родиния. В соответствии с этими данными, после окончательной стабилизации Сибирского кратона в мезо-неопротерозойской истории региона выделены пять тектонических этапов, контролируемых растяжением и сжатием континентальной коры в пределах крупных линейментных структур [Лиханов и др., 2014б]. В рамках современной концепции о суперконтинентальных циклах [Nance et al., 2014] — времени между эпохами максимального объединения континентальных блоков в суперконтинент, эти результаты открыли перспективы для обнаружения аналогичных по возрасту и тектонической позиции геологических событий на юге Енисейского кряжа.

Для решения этих задач были выбраны тектониты Ангаро-Канского блока, приуроченные к Приенисейской региональной сдвиговой зоне (ПРСЗ). Окраинно-континентальные сдвиговые зоны являют-

ся обязательным элементом структуры орогенных поясов [Passchier, Trouw, 2005]. Они возникают в различных геодинамических обстановках и контролируются комплексами орогенных и рифтогенных бластомилонитов [Иванов, Русин, 1997; Русин, 2007; Mancktelow, 2008], значение которых для реконструкции истории подвижных поясов ранее недооценивалось. Данные о термодинамических параметрах и времени проявления синдвиговых деформаций в глубинных зонах земной коры в большинстве случаев отсутствуют, а вклад деформационной компоненты в общую энергетику формирования региональных метаморфических структур рассматривался в качестве второстепенного [Tajmanova, 2013]. В последнее время выявлена важная роль синдвиговых метаморфических процессов в формировании структуры складчатых поясов [Bell et al., 2013], что обусловило приоритетное использование продуктов динамометаморфизма для решения многих петрогенетических проблем. В частности, были детально изучены процессы фрагментации вещества с обособлением реологически контрастных доменов, каждый из которых имел индивидуальную  $P$ - $T$ - $t$ - $d$  историю формирования [Aerden et al., 2013], выявлены соотношения литостатического и тектонического давления в глубинных зонах пластических сдвиговых деформаций.

В последнее время достигнут существенный прогресс в расшифровке эволюции метаморфических событий на основе сопоставления данных минеральной геотермобарометрии и изотопных датировок абсолютного возраста. Однако применение традиционной изотопии (Rb-Sr,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , U-Pb, Lu-Hf и Sm-Nd) для датирования полиметаморфических этапов часто осложняется многократной перекристаллизацией минералов-геохронометров. Также при использовании этих подходов трудно разобраться в принадлежности того или иного  $P$ - $T$  тренда к конкретному метаморфическому событию, что затрудняет анализ геодинамических причин этих процессов. Перспективным методом, позволяющим корректно увязать возраст со стадиями метаморфизма, является *in situ* CHIME (chemical U-Th-total Pb isochron method) — датирование включений U-Th-содержащих фаз (монацита, ксенотима, уранинита и др.) в зональных минералах — участниках метаморфических реакций [Suzuki et al., 1991; Montel et al., 1996; Goncalves et al., 2005]. Наиболее информативны для этих целей кристаллы граната, состав которых используется для построения  $P$ - $T$  трендов эволюции пород. Комбинация данных о вариациях параметров метаморфизма с возрастными акцессорных минералов-включений в разных генерациях граната позволяет не только оценить возраст метаморфизма, но также длительность тектонических процессов, контролирующих формирование и развитие полиметаморфических комплексов. В ряде работ показана хорошая сходимость результатов датирования *in situ* Th-U-Pb методом с изотопными данными [Suzuki, Kato, 2008; Cutts et al., 2010, 2013; Anderson et al., 2013; Лиханов и др., 2013г, 2014г; Morrissey et al., 2014; Brownik et al., 2014]. В целом же, несмотря на несколько меньшую точность по сравнению с изотопными методами, *in situ* Th-U-Pb датирование включений акцессорных радиоактивных минералов в метаморфических фазах является весьма информативным подходом для реконструкции возрастных этапов метаморфизма и длительности метаморфических событий в областях полициклического развития.

В настоящей статье приведены новые геохронологические и петрологические данные для различных по возрасту,  $P$ - $T$  параметрам метаморфизма и интенсивности деформационных преобразований метапелитов Южно-Енисейского кряжа, позволившие выделить рифейский этап в тектонической истории региона. Помимо решения региональных задач полученные сведения послужат основой для разработки согласованной геодинамической модели формирования Енисейского кряжа в докембрии и представляются важными для корреляции особенностей развития региона с геологическими процессами глобального масштаба.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА И ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

Енисейский кряж расположен на западной окраине Сибирского кратона, протягиваясь в субмеридиальном направлении вдоль р. Енисей почти на 700 км при ширине от 50 до 200 км (рис. 1, врезка). Геофизические данные свидетельствуют о вертикальном утолщении и транспрессионной обстановке: ширина складчатой области Енисейского кряжа на глубине более 10 км вдвое уменьшается, что придает ему грибовидную форму [Старосельцев и др., 2003]. Глубина залегания поверхности Мохоровичича под Енисейским кряжем по сравнению с соседними регионами увеличена от 40 до 50 км [Сальников, 2009]. Таким образом, этот складчатый ороген обладает структурой с утолщенной корой, сохранившейся в течение длительного геологического времени. Коллизионная модель формирования структуры земной коры в регионе подтверждается данными сейсмического профилирования и обосновывается «скупиванием» пород неопротерозойских формаций [Митрофанов и др., 1988; Старосельцев и др., 2003]. В строении Енисейского кряжа выделяются два крупных сегмента — Южно-Енисейский и Заангарский, разделенные субширотным Нижнеангарским региональным разломом. К югу от этого разлома выделяются два структурных элемента — раннедокембрийский кратонный Ангаро-Канский блок, образованный