



GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF MAFIC ROCKS IN THE STRUCTURE OF THE YENISEI-KHATANGA TROUGH AND THEIR BELONGING TO THE SIBERIAN TRAP PROVINCE

O.P. Polyansky ^{1✉}, Yu.F. Filippov ^{2,3}, A.Y. Selyatitskii ¹, P.O. Polyansky^{1,4}

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

³ Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

⁴ Altai-Sayan Branch of the Federal Research Center of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. Consideration is being given to the geochemical composition of the rocks, representing the hidden part of the volcanic and intrusive material in the structure of the Yenisei-Khatanga Trough (YKT), in relation to its belonging to a large igneous province (LIP) of Siberia. The geochemical characteristics of mafic rocks, presenting in the sedimentary complexes of the YKT, correspond to three types of mafic rocks allocated to the Siberian LIP: Nadezhdinsky (low Ti), Morongovsky (low Ti), and, in limited quantities, Ivakinsky (rift-related high Ti). Based on the seismic data, there was constructed a deep structural-tectonic cross-sectional model, and there was considered the position of mafic intrusions in the sedimentary section in the western junction zone of the Siberian Platform and the Kara (Taimyr-Severozemelsky) orogen. The seismic data show an anomalous area in the lower crust and at the crust–mantle boundary immediately below the YKT depocenter, whose seismic section is characterized by a chaotic scattered wave field with no reflective boundaries.

KEYWORDS: Siberian traps; magmatism; sills; dikes; Yenisei-Khatanga trough; geochemistry; trace elements; seismic profiling; seismic geological model

FUNDING: The research was funded by the Russian Science Foundation grant 23-27-00130 (<https://rscf.ru/project/23-27-00130/>).



EDN: ZOUBVT

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Oleg P. Polyansky, pol@igm.nsc.ru

Received: September 21, 2023

Revised: October 25, 2023

Accepted: November 8, 2023

FOR CITATION: Polyansky O.P., Filippov Yu.F., Selyatitskii A.Y., Polyansky P.O., 2024. Geochemical Characteristics of Mafic Rocks in the Structure of the Yenisei-Khatanga Trough and Their Belonging to the Siberian Trap Province. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (2), 0747. doi:10.5800/GT-2024-15-2-0747

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАЗИТОВ В СТРУКТУРЕ ЕНИСЕЙ-ХАТАНГСКОГО ПРОГИБА И ИХ ПРИНАДЛЕЖНОСТЬ К СИБИРСКОЙ ТРАППОВОЙ ПРОВИНЦИИ

О.П. Полянский¹, Ю.Ф. Филиппов^{2,3}, А.Ю. Селятицкий¹, П.О. Полянский^{1,4}

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

³ Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

⁴ Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

АННОТАЦИЯ. Охарактеризован геохимический состав пород, представляющих скрытую часть вулканогенного и интрузивного материала в структуре Енисей-Хатангского прогиба (ЕХП), в отношении его принадлежности к Сибирской крупной магматической провинции (КМП). Геохимические характеристики базитов, присутствующих в осадочных комплексах ЕХП, соответствуют трем типам базитов, выделяемых в Сибирской КМП: низкотитанистым надеждинского типа, низкотитанистым моронговского типа и в ограниченном количестве – высокотитанистым ивакинского типа «рифтового» этапа, выделяемого для Сибирской КМП. На основании сейсмических данных построена глубинная структурно-тектоническая модель в поперечном сечении и рассмотрено положение базитовых интрузий в осадочном разрезе в западной зоне сочленения Сибирской платформы и Карского (Таймыр-Североземельского) орогена. По сейсмическим данным фиксируется аномальная область в нижней коре и на границе кора – мантия непосредственно под депоцентром ЕХП, которая на сейсмическом разрезе характеризуется «рассеянной» хаотичной волновой картиной с отсутствием отражающих границ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сибирские траппы; магматизм; силлы; дайки; Енисей-Хатангский прогиб; геохимия; редкие элементы; сейсмопрофилирование; сейсмогеологическая модель

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00130 (<https://rscf.ru/project/23-27-00130/>).

1. ВВЕДЕНИЕ

По современным представлениям область развития сибирских траппов охватывает территорию, значительно превышающую площадь Сибирской платформы [Dobretsov, Vernikovskiy, 2001; Ernst, 2014; Augland et al., 2019; Latyshev et al., 2020; и др.]. Наибольшее внимание исследователей привлекало происхождение и характеристики траппов преимущественно в пределах Сибирской платформы, в то время как в отношении прилегающих областей наблюдается явный дефицит информации. Ее северная и северо-восточная окраины, покрытые осадочным чехлом Енисей-Хатангского и Лено-Анабарского бассейнов, являются слабоизученными в отношении распространенности и составов вулканических и интрузивных комплексов Сибирской крупной магматической провинции (Сибирская КМП).

На основании геохимического и изотопного состава пород в западной части Норильского района в ряде работ установлено деление вулканитов Сибирской КМП на три ассоциации: базальты с повышенным содержанием Ti и высокими La/Sm_n и Gd/Yb_n отношениями, аналогичные по геохимическим характеристикам OIB, базальты «переходной серии» и третий тип базальтов с низкими концентрациями Ti и низкими La/Sm_n и Sm/Yb_n отношениями [Wooden et al., 1993; Fedorenko et al., 1996]. Геодинамический контекст такого деления

рассматривался в работах [Al'mukhamedov et al., 2004; Krivolutsкая et al., 2018], в которых пермско-триасовый магматизм Сибирской платформы разделяется на рифтогенный (базальты нижних свит) и платформенный этап (базальты верхних свит), протекающие либо последовательно, либо одновременно, но на разных территориях. Было показано, что исходными расплавами для базальтоидов Сибирской платформы служили пикритоидные магмы [Zolotukhin et al., 1989].

В отношении причин и механизмов траппового магматизма Сибирской КМП существуют разные точки зрения. Астеносферный плюм, как источник траппового магматизма, при его взаимодействии в процессе подъема с субконтинентальной литосферной мантией и корой предполагался на основании данных о геохимическом и изотопном составе базальтов в работах [Wooden et al., 1993; Lightfoot et al., 1993]. Термохимическая (лабораторная) модель пермско-триасового вулканизма Сибирской КМП в результате воздействия суперплюма была разработана Н.Л. Добрецовым с соавторами [Dobretsov, 1997; Kirdyashkin et al., 2005]. Иными точками зрения на причины магматизма являются магмообразование в результате деляминации земной коры [Elkins Tanton, Hager, 2000], комбинации плюмового и рециклингового процессов [Sobolev et al., 2011]. Влияние субдукционного компонента при

ультрабыстрой субдукции на гидратационное плавление мантии переходного слоя под Сибирской платформой рассматривается в работах [Ivanov, 2015; Ivanov et al., 2018] как основной механизм формирования траппов, альтернативный плюмовому.

Ввиду ограниченной доступности базитовых комплексов в вулканогенно-осадочном разрезе Енисей-Хатангского прогиба (ЕХП) геохимическая, геохронологическая и структурная информация о базитовых телах, составляющих скрытую, глубокозалегающую часть вещества СКИП, практически отсутствует. В связи с этим авторами были исследованы представительные образцы базальтов и долеритовых интрузивных тел, вскрытых скважинами на бортовых склонах вулканогенно-осадочного чехла ЕХП и ранее не исследованных.

Цель данной статьи – охарактеризовать геохимический состав пород, представляющих скрытую часть вулканогенного и интрузивного материала в структуре чехла ЕХП, в отношении его принадлежности к Сибирской трапповой провинции, а также на основании сейсмических данных построить глубинную сейсмогеологическую модель ЕХП в поперечном сечении и рассмотреть положение базитовых интрузий в разрезе осадочного чехла в зоне сочленения Сибирской платформы, ЕХП и Карского (Таймыр-Североземельского) орогена.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ЕХП

Енисей-Хатангский прогиб является составной частью системы мезокайнозойских прогибов, окаймляющих Сибирский кратон на севере и востоке. Границы ЕХП проводятся по линии выклинивания терригенных мезозойско-кайнозойских отложений, выполняющих этот бассейн. Прогиб протягивается от низовьев Енисея до Хатангского залива на расстояние более 1000 км при ширине около 300 км и отделяет северный край Сибирской платформы от Южно-Таймырского складчатого пояса Таймыро-Североземельской складчатой области (рис. 1).

Осадочный чехол ЕХП выполнен терригенными комплексами среднетриасово-кайнозойского возраста мощностью до 7 км в депоцентре западной части прогиба (в центральной части до 12 км) с уменьшением к востоку до глубин в сотни метров в районе Хатангского залива. По фациальному составу отложений, условиям седиментации и истории формирования прогиб схож с Западно-Сибирским бассейном, с которым составляет единое целое. Под осадочным чехлом прогиба залегают пермско-триасовые вулканогенные отложения и базитовые тела, вскрытые редкими скважинами и выделяемые по геофизическим данным. Их генезис, положение в структуре ЕХП и соотношение с окружающими траппами Сибирской платформы и Горного Таймыра остаются предметом дискуссий.

Геолого-геофизические исследования [Nikishin et al., 2010; Vernikovskiy et al., 2018] показали, что ЕХП следует рассматривать как зону карбон-пермского Предтай-

мырского краевого прогиба и раннетриасового «гипотетического» рифтинга и базальтового магматизма. Внутреннее строение коры региона изучалось разными геофизическими (наиболее детально сейсмическими) методами и в настоящее время остается дискуссионным. По данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) мощность земной коры под прогибом изменяется как в поперечном, так и в продольном направлении. В центральной части ЕХП (район Рассохинского мегавала и Хатангского залива, восточнее профиля, пересекающего Гольчихинскую и Хабейскую скважины) мощность уменьшается по сравнению с соседними структурами Сибирской платформы и Южного Таймыра и достигает около 36 км [Kostyuchenko, 2000]. Толщина коры увеличивается к западу прогиба (район рассматриваемого профиля) до более 40 км, при этом морфология границы Мохо приобретает нерегулярный характер (см. раздел Результаты сейсмических исследований).

Мощность современной литосферы в области сочленения Таймырского орогена и Сибирской платформы определена на основе сейсмологических методов в работе [Priestley, McKenzie, 2013]. По этим данным отчетливо различаются литосферные блоки Карской плиты толщиной до 190–200 км и северной части Сибирской платформы толщиной до 200–210 км. Промежуточная область между ними в районе ЕХП характеризуется явным утонением литосферы до 160–180 км.

В отношении структуры ЕХП строятся различные сценарии происхождения, основанные на геологических данных и интерпретации данных сейсмопрофилирования [Nikishin et al., 2010; Kontorovich, 2011; Afanasenkov et al., 2016, 2017; Afanasenkov, 2019; Kushnir, 2016, 2018; Vernikovskiy et al., 2018; Kontorovich, Filippov, 2021].

За последние годы на территории ЕХП и прилегающих территориях Сибирской платформы и Таймыра получен большой объем новых сейсмических, геоэлектрических и гравимагнитных данных, что позволяет увидеть весьма сложный характер поведения границы Мохо под прогибом [Reference Geological and Geophysical Profiles..., 2013; Kushnir, 2018; Afanasenkov et al., 2017]. Анализ состояния проблемы показывает, что, несмотря на значительный прирост геолого-геофизических данных (главным образом сейсмических), современные представления о генезисе ЕХП остаются крайне противоречивыми.

В отношении проблемы формирования ЕХП одни авторы [Staroseltsev, 2008; Kontorovich, 2011; Kushnir, 2018; Kontorovich, Filippov, 2021] по геофизическим данным не находят свидетельств распространения мощных позднепермско-раннетриасовых магматических образований и ступенчатых сбросов в основании прогиба, характерных для классических рифтов. Другие связывают магматизм ЕХП с раннетриасовым рифтогенезом, как восточной ветви крупной разновозрастной грабен-рифтовой системы, получившей развитие на территории ЗСП [Medvedev et al., 2003; Dobretsov

et al., 2013; Afanasenkov et al., 2017; Vernikovskiy et al., 2018]. При этом оценка роли пермско-триасового траппового магматизма в становлении ЕХП у разных специалистов также разнится. Одной из возможных причин глобального проявления магматизма является воздействие суперплюма, охватившего значительно более широкие территории Сибирской КМП, включая регионы Горного Таймыра и ЕХП [Dobretsov, Vernikovskiy,

2001; Augland et al., 2019; Vernikovskiy et al., 2018, 2022; Kurapov et al., 2021].

3. МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ ИЗУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

Образцы базитов были отобраны из кернового материала семи скважин на пяти площадях, расположенных на прибортовых склонах ЕХП на расстоянии с запада на восток около 900 км вдоль продольной оси

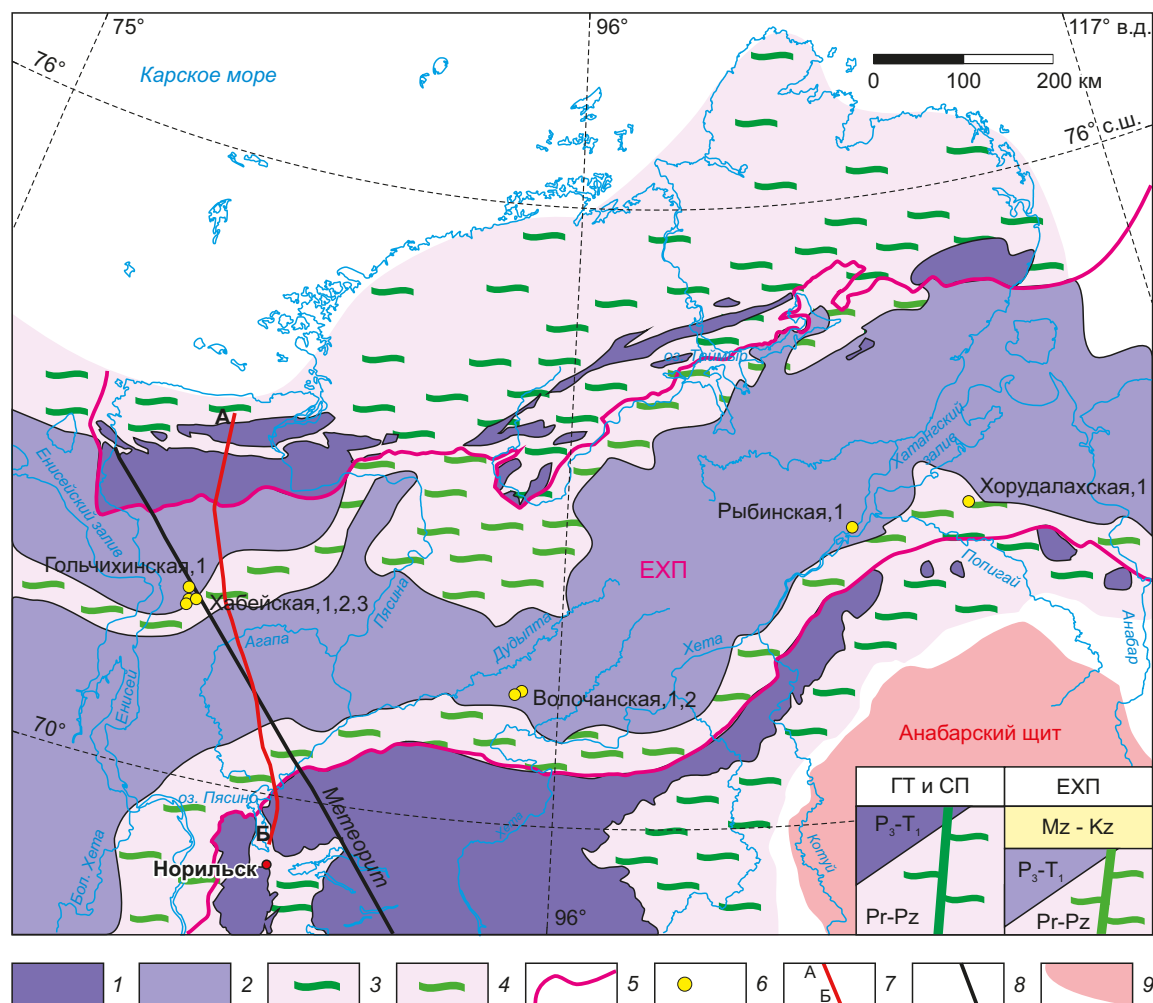


Рис. 1. Схема распространности пермско-триасовых трапповых вулканитов Енисей-Хатангского прогиба и прилегающих территорий.

1 – зоны выходов на дневную поверхность излившихся базальтов и их туфов [Database of State Geological Maps..., 2023]; 2 – они же, погребенные под мезозойско-кайнозойскими осадками ЕХП (вскрытые скважинами и предполагаемые по геофизическим данным (по [Afanasenkov, 2019])); 3 – зоны выходов на дневную поверхность базитовых интрузий [Database of State Geological Maps..., 2023]; 4 – они же, погребенные под мезозойско-кайнозойскими осадками ЕХП (вскрытые скважинами и предполагаемые); 5 – границы ЕХП; 6 – скважины, вскрывшие пермско-триасовые вулканиты; 7 – глубинный сейсмический профиль по данным метода общей глубинной точки (МОГТ); 8 – профиль ГСЗ «Метеорит»; 9 – Анабарский щит. Во вставке – принципиальная схема положения трапповых вулканитов в геологическом разрезе ЕХП и прилегающих территорий Горного Таймыра (ГТ) и Сибирской платформы (СП).

Fig. 1. Schematic distribution of the Permian-Triassic trap volcanics of the Yenisei-Khatanga trough and adjacent regions. 1 – zones of outcrops of erupted basalts and their tuffs [Database of State Geological Maps..., 2023]; 2 – the same materials buried under the Mesozoic-Cenozoic sediments of the YKT (ЕХП in Figure) (penetrated by boreholes and inferred from the geophysical data (after [Afanasenkov, 2019])); 3 – zones of outcrops of mafic intrusions on the day surface [Database of State Geological Maps..., 2023]; 4 – the same materials buried under the Mesozoic-Cenozoic sediments of the YKT (penetrated by wells and inferred); 5 – boundaries of the YKT; 6 – wells that exposed the Permian-Triassic volcanics; 7 – depth-sounding profile from the Common Depth Point (CDP) data; 8 – DSS profile "Meteorite"; 9 – Anabar Shield. In the inset – a schematic diagram of the position of trap volcanics in the geological section of the YKT and the adjacent regions of Mountainous Taimyr (ГТ) and the Siberian Platform (СП).

бассейна (рис. 1). Местоположение точек отбора образцов дает возможность охарактеризовать состав магматических образований на значительной площади бассейна, а разное стратиграфическое положение тел траппов и особенностях состава в зависимости от глубины. Литологические разрезы с указанием местоположения исследованных образцов базальтов приведены на рис. 2.

Отобранные образцы базитов расположены в туфолововой толще верхнепермских – нижнетриасовых

отложений на современных глубинах 950–3100 м и представляют собой либо пластовые интрузивные тела (дайки и силлы), либо покровы базальтов, их туфы и туффиты. В работе [Afanasenkov, 2019] приведена схема распространения пермско-триасовых вулканогенных отложений, на которой показано, что по геофизическим данным и данным бурения в разрезе ЕХП тела базальтов залегают почти повсеместно, аналогично трапповым комплексам на прилегающих территориях СП и Горного Таймыра при такой же мощности, конформно подстилающим и перекрывающим отложениям

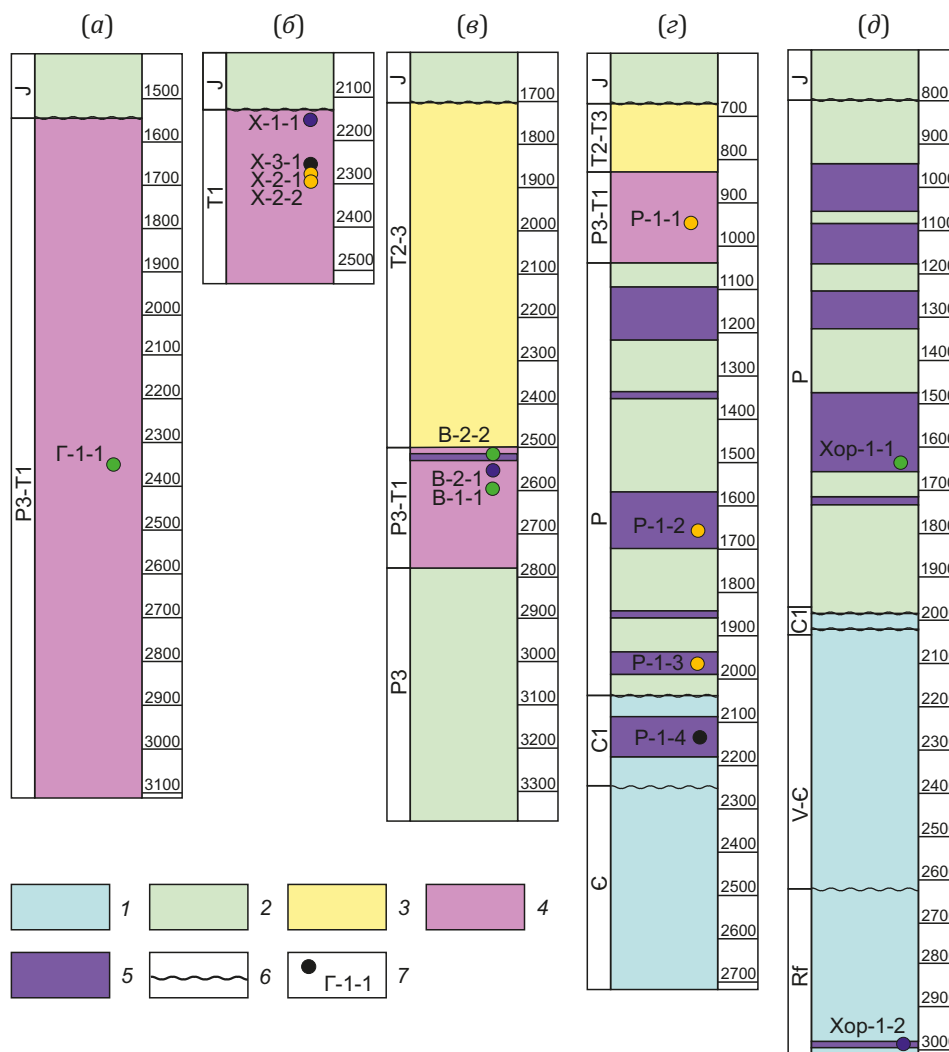


Рис. 2. Сводные литологические разрезы, вскрытые скважинами на площадях ЕХП (с использованием данных [Database of State Geological Maps..., 2023; Afanasenkov, 2019]) ((а) – Гольчихинская, (б) – Хабейская, (в) – Волочанская, (г) – Рыбинская, (д) – Хорудалахская).

1–3 – осадочные комплексы: 1 – преимущественно карбонатные (морские), 2 – преимущественно терригенные (переходные прибрежно-морские и прибрежно-континентальные), 3 – терригенные (континентальные); 4–5 – вулканогенные комплексы: 4 – базальты, туфы, туффиты, 5 – интрузивные тела базитов; 6 – стратиграфические перерывы; 7 – положение и номера образцов. Цвет точек соответствует геохимическим группам пород, выделенным по составу.

Fig. 2. Composite lithological sections penetrated by wells in the YKT areas (using the data [Database of State Geological Maps..., 2023; Afanasenkov, 2019]) ((а) – Golchikhinskaya, (б) – Khabeyskaya, (в) – Volochanskaya, (г) – Rybinskaya, (д) – Khorudalakhskaya).

1–3 – sedimentary complexes: 1 – predominantly carbonate (marine), 2 – predominantly terrigenous (coastal to marine and coastal to continental transition), 3 – terrigenous (continental); 4–5 – volcanogenic complexes: 4 – basalts, tuffs, tuffites, 5 – intrusive mafic bodies; 6 – stratigraphic breaks; 7 – position and numbers of samples. The color of the dots corresponds to the geochemical groups of rocks ranked by composition.

(см. рис. 1). И только на южном борту прогиба, а также в пределах Янгодо-Горбитского выступа и Тарейского вала выделяются зоны тектонической денудации эффузивных отложений в средне- и поздне триасовое время или резкого сокращения их мощности. На этих территориях предполагается наличие более глубоких интрузивных базитов (см. рис. 1).

Мощность вскрытых скважинами эффузивных образований убывает с запад на восток с более 1570 м (основание не вскрыто) на Гольчихинской площади до 300 м на Волочанской и 200 м на Рыбинской площади. На Хорудалахской площади, расположенной еще западнее, эти отложения, вероятнее всего, были размыты в предъюрское время.

Интрузивные тела долеритов, вскрытые скважинами в восточной, приподнятой, части прогиба, располагаются непосредственно под эффузивами и представляют собой серию пластовых или секущих тел толщиной от первых метров до 100–150 м. Большая часть из них приурочена к пермским отложениям, но встречаются и среди более древних подстилающих отложений палеозоя. В более погруженных западных районах ЕХП эти тела скважинами не вскрыты из-за больших глубин.

4. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аналитические методы. Составы пород исследовали методами рентгенофлуоресцентного анализа и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Содержания редких, в том числе редкоземельных, элементов в породах ЕХП были определены на масс-спектрометре ELAN 9000 с индуктивно связанной плазмой и приставкой LSX-500 в лаборатории физических и химических методов исследования Института геологии и геохимии УрО РАН. Автоклавное разложение проводится в тefлоновых стаканах с кожухами из нержавеющей стали смесью кислот $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ при температуре 200 °C, процедура анализа приведена в [Votyakov et al., 2006].

Химические анализы пород на основные порообразующие оксиды выполнены рентгенофлуоресцентным методом на рентгеновском спектрометре ARL-9900-XP фирмы Applied Research Laboratories (аналитик Н.Г. Карманова) в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск).

Геохимические дискриминационные и мультиэлементные диаграммы построены с использованием программы PetroGram [Gunduz, Asan, 2021].

Геофизические методы. В целях получения глубинной структурно-тектонической модели ЕХП в поперечном сечении и земной коры региона была проведена интерпретация композитного субмеридионального сейсмического профиля МОГТ в западной части прогиба, длиной около 500 км, выполненного АО «Таймыр-геофизика» с использованием мощных вибрационных источников при длительности записи до 18 с. Максимальное удаление между пунктом приема и пунктом взрыва составляло 6–8 км (кратность 80–160), система наблюдений – центральная. Для трансформации вре-

менного разреза в глубинный был проведен анализ скоростных характеристик толщ: для приповерхностных осадочных комплексов использовались результаты акустических исследований в скважинах (акустический каротаж и материалы вертикального сейсмического профилирования), для глубокопогруженных складчатых и метаморфизованных комплексов – материалы ГСЗ (профиль «Метеорит», пройденный вблизи профиля МОГТ (положение на рис. 1)). Реализация трансформационных процедур и дальнейшая интерпретация проводилась в оригинальном программном пакете «W-Seis», разработанном в лаборатории сейсмогеологического и математического моделирования нефтегазоносных систем ИНГГ СО РАН (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. W-seis. № 2011610211).

Сейсмостратиграфический анализ волновой картины включал выделение характерных сейсмокомплексов, прослеживание и стратиграфическую привязку основных отражающих горизонтов. Привязка осуществлялась как по скважинам, вскрывшим верхние интервалы разреза, так и по выходам осадочных комплексов у северных и южных границ ЕХП на дневную поверхность.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

5.1. Глубинная модель сейсмогеологического разреза

Всего было выделено до 10 сейсмокомплексов и границ в мезозойской части разреза и 6 в палеозойской и рифейской. Их геометрия, структурные взаимоотношения, а также осложняющие дизъюнктивные нарушения показаны на рис. 3. Из-за невысокого разрешения на больших глубинах структурно-тектоническая модель в наиболее погруженных частях разреза носит достаточно прогнозный характер, тем не менее представляется возможным установить основные закономерности.

Прежде всего обращает на себя внимание прослеживание и погружение под осевую часть ЕХП рифейско-палеозойских осадочных комплексов, составляющих чехол Сибирской платформы. Характер напластования этих комплексов и небольшие градиенты мощностей указывают на их платформенный характер на всей территории ЕХП и в смежных районах. В северной части они наиболее сильно дислоцированы и осложнены серией надвиговых структур и листрических взбросов, связанных с коллизионно-орогенными процессами при формировании Таймырского орогена в позднепалеозойское – раннемезозойское время и выполаживающихся на глубинах 4–8 км. Непосредственно под ЕХП надвиговой характер дислокаций не прослеживается и постепенно к югу уступает место пликативному с осложняющими субвертикальными разломами, указывающими на формирование дислокационных структур в условиях сжатия.

Кровля рифейских комплексов погружается от 3 км в северной части профиля до глубин порядка 14 км

в осевой части прогиба, вновь воздымаясь до 5 км в южной части. При этом в обоих бортах прогиба выделяются складчатые структуры, в пределах которых предполагается значительная денудация палеозойских осадочных комплексов. В плане эти зоны отчетливо прослеживаются и по гравимагнитным данным [Kontorovich, Filippov, 2021].

Кровля архейско-протерозойского метаморфизованного фундамента, условно выделяемая по прекращению прослеживания отражающих границ и хаотичной волновой картине, выделяется на глубинах от 10 км в северной и южной части профиля до более 20 км в осевой части прогиба. На противоположных флангах ЕХП прослеживаются локальные поднятия кровли архей-протерозойского фундамента.

Граница Мохо в волновой картине ОГТ проявлена очень слабо и фрагментарно. В северной части профиля она поднимается от глубин 40–41 км в районах Горного Таймыра до 39 км ближе к осевой части прогиба, где волновая картина ретуширована аномальной зоной в нижней части коры шириной более 100 км. Далее к югу граница не прослеживается.

На сейсмическом разрезе ОГТ зона характеризуется полным отсутствием амплитудных отражающих границ, контрастно выраженной «рассеянной» хаотичной волновой картиной. По материалам интерпретации предыдущих геофизических исследований, приведенным в работе [Kushnir, 2018], аномальная зона выражается повышением скорости распространения упругих колебаний до 6.9–7.4 км/с по продольным волнам

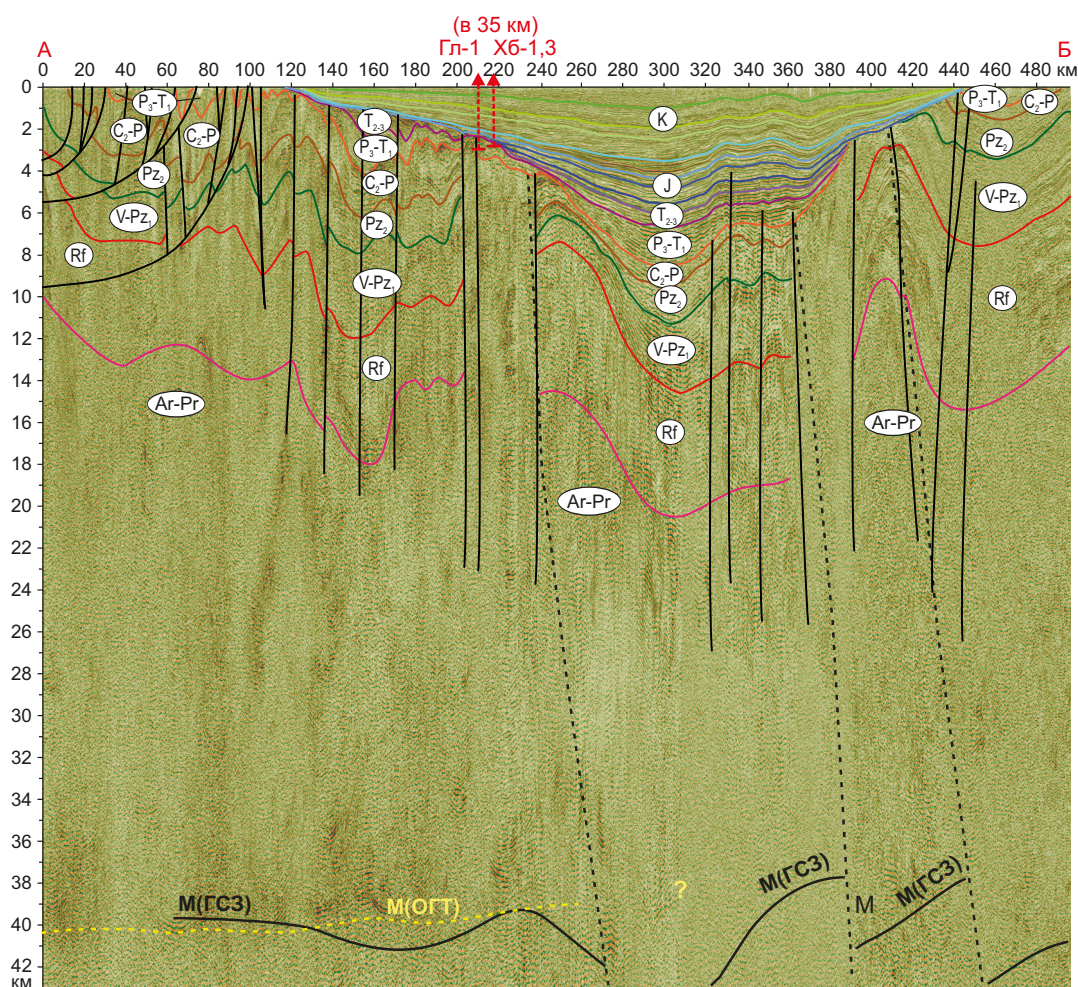


Рис. 3. Глубинная модель сейсмогеологического разреза по композитному профилю А–Б (положение профиля на рис. 1). Цветными линиями показаны отражающие горизонты разных стратиграфических уровней, черными – предполагаемые разломы, индексами в овалах – предполагаемый возраст сейсмофациальных комплексов между ними. Линии М(ОГТ) и М(ГСЗ) – предполагаемые границы Мохо по данным ОГТ и ГСЗ [Reference Geological and Geophysical Profiles..., 2013] соответственно. Черными пунктирными линиями обозначены предполагаемые по данным ГСЗ сквозькоровые тектонические нарушения. Гл-1 – скважина на Гольчихинской площади, Хб-1, 3 – скважины Хабейской площади.

Fig. 3. Depth model of the seismogeologic section along composite profile A–B (profile position in Fig. 1).

Colored lines show reflective horizons of different stratigraphic levels, black lines are inferred faults; indices in ovals are inferred ages of seismofacial complexes between the inferred faults. M(ОГТ) and M(ГСЗ) lines are the inferred Moho boundaries according to the CDP and DSS data [Reference Geological and Geophysical Profiles..., 2013], respectively. Black dashed lines indicate trans-crustal tectonic faults inferred based on the DSS data. Гл-1 – well in the Golchikhinsky area, Хб-1, 3 – wells in the Khabeytsky area.

и до 4.2 км/с по поперечным [Surkov et al., 1987; Kosyuchenko, 2000], понижением удельного электрического сопротивления на геоэлектрическом профиле, локальным гравитационным максимумом в плане (после нивелирования эффектов осадочного чехла и кристаллического фундамента [Kazais, Yagantsev, 1971; Kushnir, 2016], повышением геотермического градиента [Smirnov, 1980].

По данным ГСЗ [Reference Geological and Geophysical Profiles..., 2013] граница Мохо имеет сложный характер и испытывает вариации глубин на отдельных участках с разрывами до 2–3 км по вертикали. Разрывы границы Мохо контролируются наличием крупных сквозь-коровых разломных зон, выделяемых под осадочным чехлом ЕХП на его флангах (рис. 3).

В северной, притаймырской, части профиля граница М фиксируется на глубинах 39–42 км, непосредственно под ЕХП диапазон глубин составляет от 45 до 38 км.

Верхнепермско-нижнетриасовый трапповый комплекс выделяется практически на всем протяжении профиля, за исключением вышеупомянутых поднятых блоков фундамента в бортах прогиба, где они, вероятно, денудированы вместе со значительной частью палеозойских отложений в позднетриасовое – раннеюрское время. Мощность комплекса в наиболее погруженной части ЕХП достоверно оценить трудно, но по данным авторов она вряд ли превышает 2–3 км. В целом, комплекс имеет конформную с перекрывающими и подстилающими отложениями структуру, широкое площадное распространение при отсутствии разломов ступенчатого характера, что подтверждает ранее сделанные выводы [Kontorovich, 2011; Kushnir, 2016, 2018; Kontorovich, Filippov, 2021].

5.2. Петрографическое описание базитов ЕХП

Все изученные из отобранных кернов образцы горных пород по петрографическому составу относятся к базальтам/долеритам, и все в том или ином количестве содержат темно-бурое мелкозернистое вещество (продукт изменения стекла?). В отдельных фрагментах керна, которые имеются в распоряжении авторов, не представляется возможным определить принадлежность опробованного геологического тела, вскрытого скважиной, к гипабиссальному или эффузивному генезису, т.е. к интрузиву (силлу/дайке) или лавовому покрову. В связи с этим петрографическое название изученных базитов – «долерит», как гипабиссальная интрузивная разновидность, или «базальт», как эффузивная, – давалось с учетом стратиграфического положения конкретного фрагмента керна, исходя из описания литологического разреза по каждой скважине ([Database of State Geological Maps..., 2023; Afanasenkov, 2019]; см. рис. 2).

Петрографическое описание шлифов изученных образцов базитов сгруппировано согласно выявленным в работе геохимическим и петрохимическим харак-

теристикам, приведенным далее. Микрофотографии шлифов представительных образцов базитов из разных групп приведены на рис. 4.

Геохимическая группа А (рис. 4, а, б): обр. Г-1-1, В-1-1, В-2-2, В-2-2а – базальты, обр. Хор-1-1 – долерит. Минеральный состав базальтов: Pl+Срх+рудные фазы. В образце долерита, помимо указанных минералов, присутствует также оливин, в виде мелких изометричных или ксеноморфных зерен в интерстициях между лейстами плагиоклаза.

Все образцы группы характеризуются одной тектурно-структурной особенностью. Структура базитов комбинированная – мелкокристаллическая пойкилоофито-интерсертальная. Участки с пойкилоофитовой структурой сложены пойкилитовыми зернами клинопироксена, заполненными вросками длиннопризматического плагиоклаза. Такие участки имеют изометричный облик и макроскопически серый оттенок. Промежутки между такими серыми «пятнами» имеют интерсертальную структуру и заполнены длиннопризматическим плагиоклазом и интерстиционным темно-бурым веществом и рудной фазой. Визуально, за счет разницы в фазовом составе и цвете, сочетание в породе участков с пойкилитовой и интерсертальной структурами создает характерную мелкопятнистую текстуру. Отметим, что для данной группы была обнаружена 100%-ная корреляция между геохимическими и тектурно-структурными особенностями – все образцы пород, имеющие пойкилоофито-интерсертальную структуру и при этом мелкопятнистую текстуру, относятся к этой геохимической группе. При этом они взяты из трех разных скважин, находящихся на значительном удалении друг от друга (см. рис. 1, 2). Такого сочетания структурных и текстурных особенностей больше нет ни в одной геохимической группе.

Геохимическая группа В (рис. 4, в–е): обр. Х-2-1, Х-2-2, Р-1-1 – базальты, обр. Р-1-2, Р-1-3 – долериты. Минеральный состав базальтов: Pl+Срх+рудная фаза. В долеритах присутствует также оливин. Структуры пород: порфировидная и гломеропорфировая с отдельными вкрапленниками таблитчатого плагиоклаза и их скоплениями. В долеритах кроме плагиоклаза присутствуют также вкрапленники изометричного оливина. Структура основной массы мелкокристаллическая офитовая, местами пойкилоофитовая и интерсертальная. Плагиоклаз таблитчатого облика, в интерстициях зерна клинопироксена и неправильно угловатые участки бурой мелкозернистой массы. Мелкие зерна оливина в основной массе идиоморфны по отношению к плагиоклазу.

Геохимическая группа С (рис. 4, ж, з): обр. Х-1-1, В-2-1 – базальты, Хор-1-2 – долерит. Минеральный состав базальтов: Pl+Срх+рудная фаза. Структура интерсертальная и офитовая тонкокристаллическая. Длиннопризматические лейсты плагиоклаза содержат в интерстициях бурую мелкозернистую массу и мелкие изометричные зерна клинопироксена. В обр. В-2-1 широко распространена рудная фаза (до 5–8 об. %) в виде

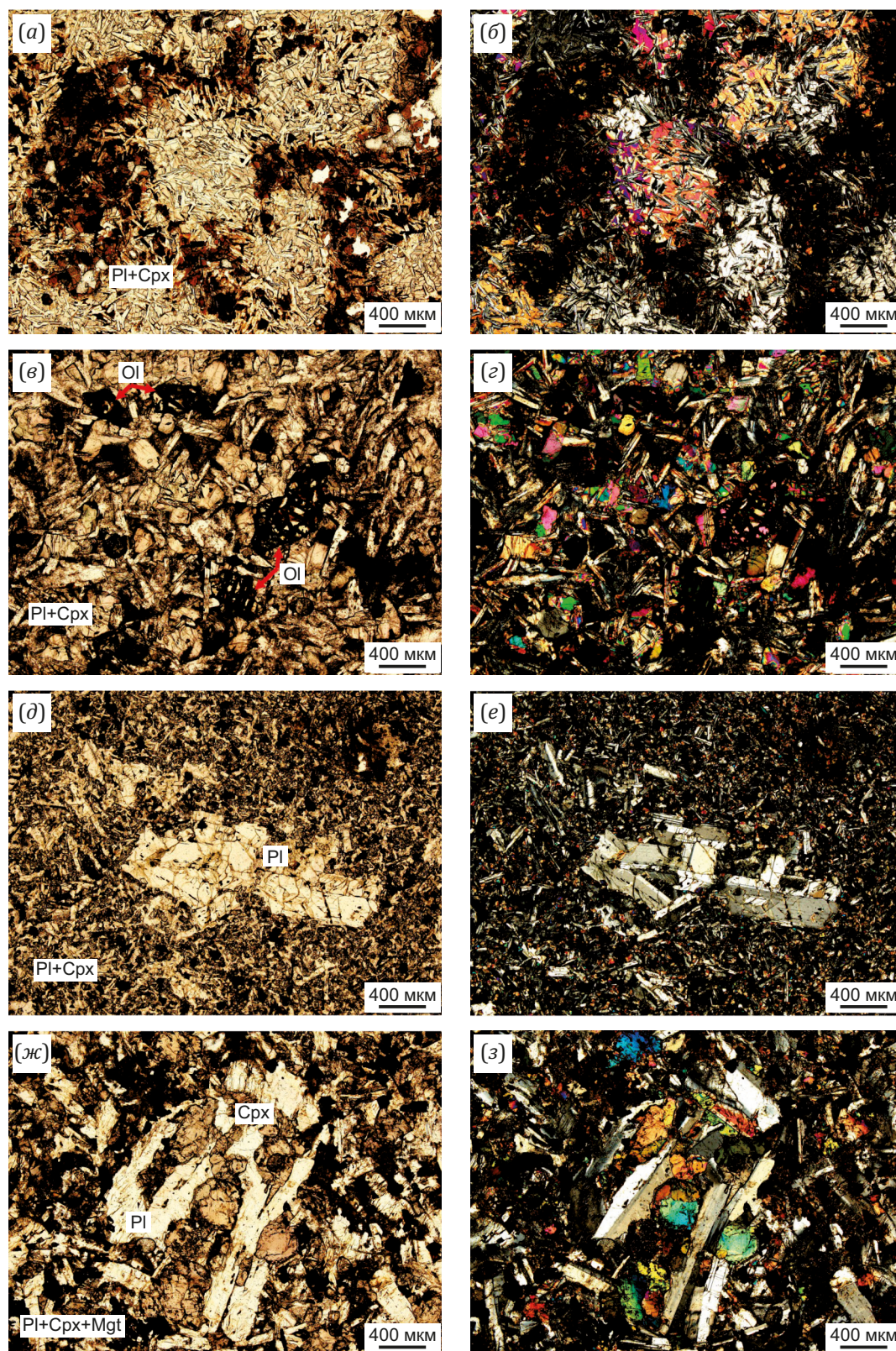


Рис. 4. Микрофотографии шлифов базитов, расположенных в осадочных комплексах Енисей-Хатангского прогиба. (а, б) – базальт, геохимическая группа А (обр. В2-2); (в–е): геохимическая группа В: (в, г) – долерит (обр. Р1-3), (д, е) – базальт (обр. Х2-1); (жс, з) – долерит, геохимическая группа С (обр. Хор1-2). Левая часть рисунка – проходящий свет (а, в, д, жс), правая – николи скрещены (б, г, е, з). Pl – плагиоклаз, Cpx – клинопироксен, Ol – оливин, Mgt – магнетит.

Fig. 4. Microphotographs of thin sections of mafic rocks located in the sedimentary complexes of the Yenisei-Khatanga trough. (а, б) – basalt, geochemical group A (sample B2-2); (в–е): geochemical group B: (в, г) – dolerite (sample P1-3), (д, е) – basalt (sample X2-1); (жс, з) – dolerite, geochemical group C (sample Khor1-2). The left side of the figure is transmitted light (а, в, д, жс), the right side is crossed nicols (б, г, е, з). Pl – plagioclase, Cpx – clinopyroxene, Ol – olivine, Mgt – magnetite.

зерен неправильной формы. В обр. Х-1-1 рудный минерал имеет тонкопластинчатую форму.

Обр. Хор-1-2 – долерит с гломеропорфировой структурой, образованной скоплением лейст плагиоклаза и зерен клинопироксена. В таких скоплениях плагиоклаз и клинопироксен имеют взаимоотношения пойкилоофитовой структуры. Структура основной массы – офитовая. Между лейстами плагиоклаза расположены зерна клинопироксена и участки бурой мелкозернистой массы. Этот образец, так же как и обр. В-2-1, характеризуется повышенным количеством рудной фазы (до 7–8 об. %) с квадратными и треугольными сечениями.

Образцы, не вошедшие в перечисленные три группы: обр. Р-1-4 – долерит. Минеральный состав: Pl+Crpx+Bt+рудная фаза. Структура порфировидная, во вкраплениях клинопироксен. Структура основной массы мелко- и среднекристаллическая офитовая, местами пойкилоофитовая. В интерстициях лейстовидного плагиоклаза – клинопироксен, мелкозернистая бурая масса и красновато-бурый биотит. По внешнему облику этот образец похож на среднекристаллическое меланогаббро.

5.3. Геохимические характеристики пород

Состав исследованных базитов, расположенных в осадочном чехле ЕХП, приведен в Прил. 1, табл. 1.1. Все породы относятся к низкомагнезиальным ($MgO < 8$ мас. %)

толеитовым субщелочным базальтам (рис. 5). Максимальное содержание MgO 8.91 мас. % установлено в обр. Х1-1 на западном окончании ЕХП, расположенном наиболее близко (из изученных) к Норильскому рудному ареалу. На дискриминационной диаграмме $Zr/Y - Zr$ [Pearce, Norry, 1979] (рис. 5, г) они лежат в поле внутриплитных базальтов. По содержанию титана породы в основном представлены умеренно титанистыми ($TiO_2 < 2$ мас. %) базитами, а также присутствуют высокотитанистые базиты (содержание $TiO_2 = 4.01$ (В2-1), 3.38 (Р1-4), 3.09 мас. % (Хор1-2)), расположенные на южном склоне прогиба, обрамляющем край Сибирской платформы.

Химическая классификация континентальных излившихся базальтов традиционно основывается на содержании TiO_2 или соотношении Ti/Y [Xiao et al., 2004]. На рис. 6 приведена диаграмма соотношения TiO_2 и $Mg\#$ для вулканических пород, на которой базиты ЕХП характеризуются отрицательной корреляцией содержания титана с показателем магнезиальности. Породы подразделяются на три группы: группа А – умеренно титанистые (1.5–2.0 мас. %), группа В – низкотитанистые с содержанием TiO_2 около 1 мас. % и группа С – высокотитанистые вулканы (2.5–4.0 мас. %). По соотношению TiO_2 и $Mg\#$ базиты группы С являются более титанистыми, но менее магнезиальными в сравнении с высокотитанистыми лавами нижней

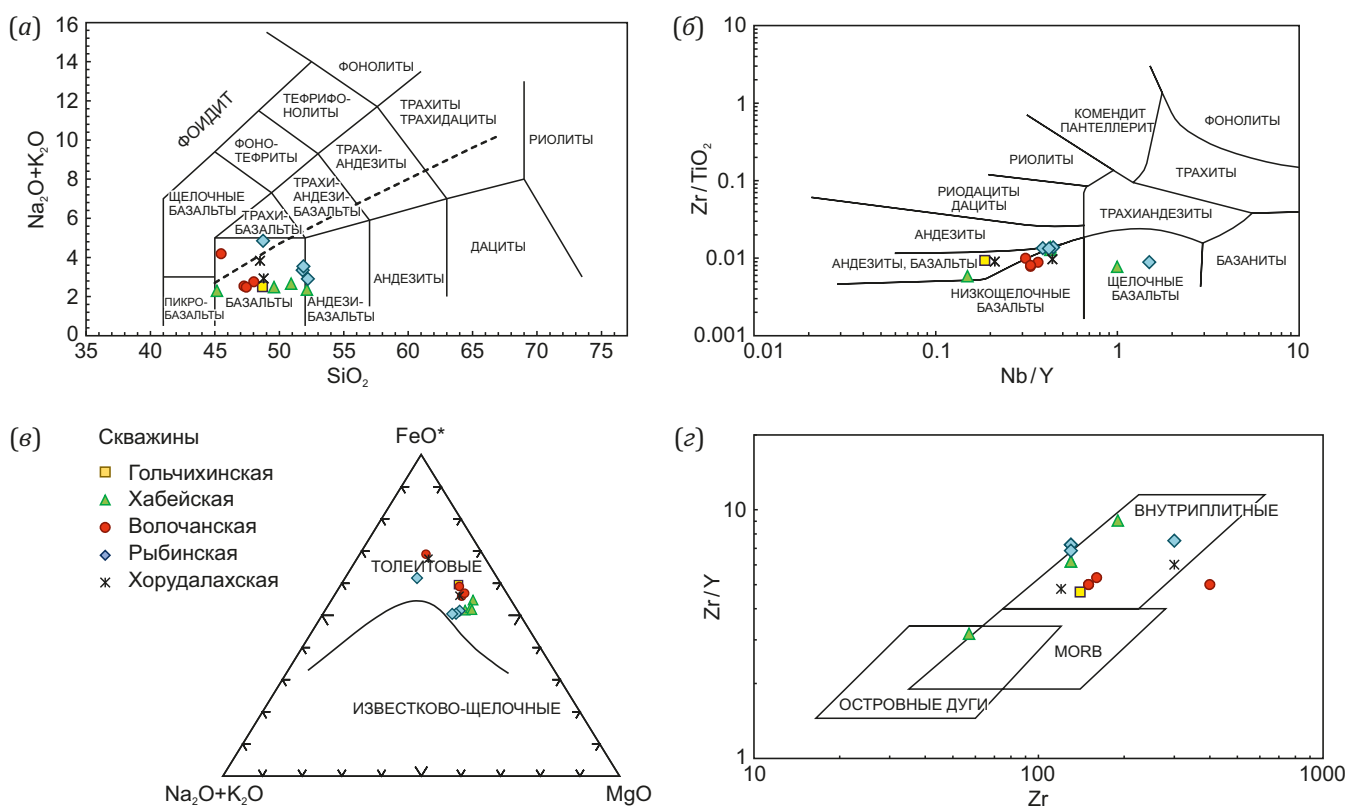


Рис. 5. Дискриминационные диаграммы базитовых пород ЕХП: (а) – [Le Bas et al., 1986]; (б) – [Winchester, Floyd, 1977]; (в) – [Irvine, Baragar, 1971]; (г) – [Pearce, Norry, 1979].

Fig. 5. Discrimination diagrams of the YKT basic rocks: (a) – [Le Bas et al., 1986]; (б) – [Winchester, Floyd, 1977]; (в) – [Irvine, Baragar, 1971]; (г) – [Pearce, Norry, 1979].

стратиграфической последовательности норильских вулканитов [Lightfoot et al., 1993].

Бинарные дискриминационные диаграммы исследованных базитов ЕХП в сравнении с норильскими и тунгусскими вулканитами приведены на рис. 7. На рисунке с бинарными диаграммами видно, что невозможно однозначно отнести исследуемые образцы к конкретному генетическому типу рифтогенных или покровных базитов, выделяемых в работе [Al'mukhamedov et al., 2004]. Выделенные нами три геохимические группы образцов перекрываются либо с «рифтогенными», либо с «покровными» базитами, либо с обоими типами. Например, образцы, отнесенные к группе А и В (низко-Ti), на диаграммах $MgO - Al_2O_3$ и $MgO - CaO$ (рис. 7, а, б) полностью перекрываются с полями рифтогенных базитов туклонской, надеждинской и гудчихинской свит и одновременно с полями покровных базитов моронговской и хараелахской свит, а на диаграмме $MgO - FeO$ (рис. 7, в) базиты группы В перекрываются с рифтогенными породами туклонской и надеждинской свит, а базиты группы А – с покровными породами моронговской свиты и одновременно с полем расплавных включений из оливинов рифтогенных пород гудчихин-

ской свиты (в сравнении с данными [Al'mukhamedov et al., 2004; Krivolutskaya et al., 2018; Sobolev et al., 2009]). Важно отметить отсутствие принадлежности выделенных петрогеохимических групп базитов к какой-либо конкретной площади бассейна, а также отсутствие корреляции состава со стратиграфическим положением образца.

Анализ спектров распределения редких элементов в изученных вулканитах ЕХП (рис. 8), нормированных к примитивной мантии, позволяет рассматривать три кластера со сходным распределением, соответствующим разбиению по содержанию TiO_2 , FeO и MgO (см. рис. 7); в петрографическом описании они обозначены как группы А, В и С. Эти группы имеют определенные геохимические различия и сходства между собой, выраженные в уровне концентраций редких элементов и группировке их мультиэлементных и редкоземельных спектров. Все три группы имеют положительную аномалию по Y и Zr, группы А и В – также положительную аномалию по Sr и отрицательную аномалию по Р. Группа В также имеет ярко выраженную Nb-Ta аномалию и отличается от двух других более высокими концентрациями Rb. Аномальными во всей выборке

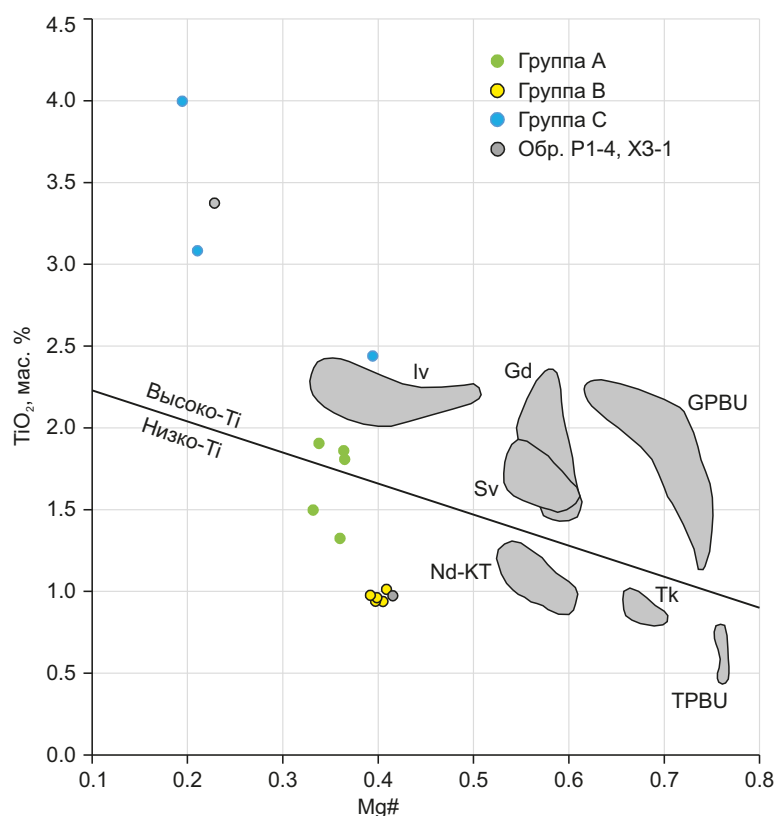


Рис. 6. Соотношения между TiO_2 и $Mg\#$ для низко-, умеренно- и высокотитанистых магм ЕХП (кружки), в сравнении с составами вулканогенных пород для ивакинской (Iv), сыверминской (Sv), гудчихинской (Gd), надеждинской-хаканчанской (Nd-KT), туклонской (Tk) свит, гудчихинских (GPBU) и туклонских (TPBU) пикритов Норильского района по данным [Lightfoot et al., 1993]. Цвет кружков соответствует геохимическим группам, выделенным по спектрам РЗЭ.

Fig. 6. Relationships between TiO_2 and $Mg\#$ for low-, moderate- and high-Ti YKT magmas (circles), in comparison with the compositions of volcanogenic rocks for Ivakinsky (Iv), Syverminsky (Sv), Gudchikhinsky (Gd), Nadezhdinsky-Khakanchansky (Nd-KT) and Tuklonsky (Tk) formations, and Gudchikhinsky (GPBU) and Tuklonsky (TPBU) picrites of the Norilsk region according to the data from [Lightfoot et al., 1993]. The color of the circles corresponds to the geochemical groups ranked by REE spectra.

базитов Енисей-Хатангского прогиба являются два образца (P1-4 и X3-1), первый из которых содержит максимально высокие концентрации большинства редких элементов, а второй – наиболее низкие (рис. 8, а), имея сходство с породами трех выделенных групп ЕХП

только в области наиболее совместимых элементов – от Ho-Er до Lu, включая положительную Y аномалию, что может указывать на геохимическое изменение состава этих образцов при поздних наложенных гидротермальных процессах.

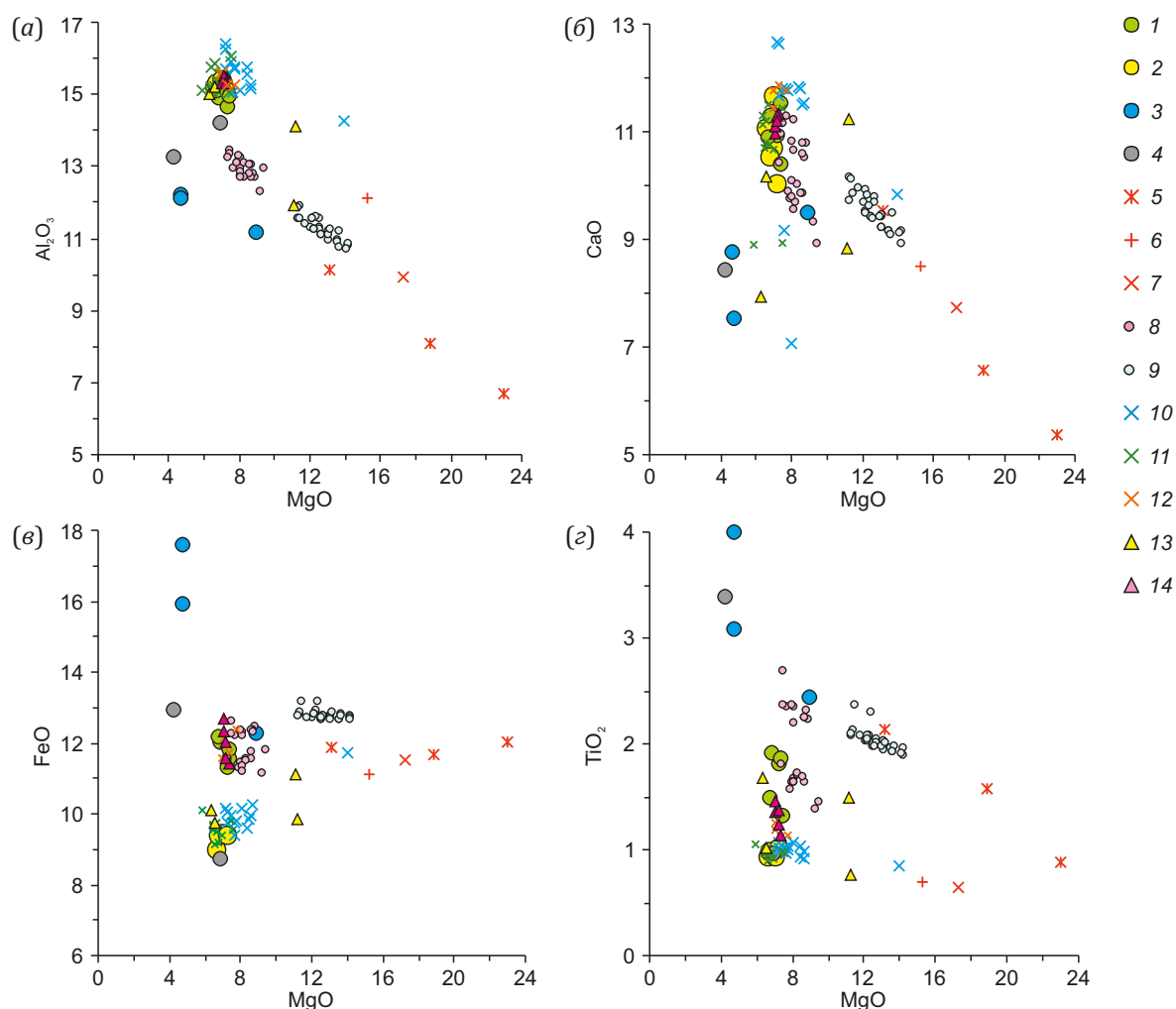


Рис. 7. Петрохимические характеристики базитов Енисей-Хатангского прогиба в сравнении с опубликованными данными по сибирским траппам (в мас. %).

1–4 – базиты ЕХП (наши данные), геохимическая группа: 1 – А, 2 – В, 3 – С, 4 – не вошедшие ни в одну группу; 5–9 – данные [Sobolev et al., 2009]: 5–7 – высокомагнезиальные (пикритовые) породы Норильского района Сибирской трапповой провинции: 5 – гудчихинская свита, 6 – туклонская свита, 7 – надеждинская свита, 8 – захваченные расплавные включения в оливинах из пикритов гудчихинской свиты, 9 – рассчитанные составы первичных расплавов гудчихинской свиты; 10–12 – вулканические породы восточной части Норильского района по данным [Krivolutskaya et al., 2018]: 10 – туклонская свита, 11 – надеждинская свита, 12 – моронговская свита; 13–14 – средние составы лавовых свит Тунгусской синеклизы по данным [Al'mukhamedov et al., 2004] с привязкой к геодинамическому этапу: 13 – рифтогенный этап (сыверминская, гудчихинская, туклонская, надеждинская свиты), 14 – покровный этап (моронговская, мокулаевская, хараелахская, кумчинская, самоедская свиты).

Fig 7. Petrochemical characteristics of basites of the Yenisei-Khatanga trough in comparison with the published data on the Siberian traps (in wt. %).

1–4 – YKT basites (our data), geochemical group: 1 – A, 2 – B, 3 – C, 4 – not included in any group; 5–9 – data [Sobolev et al., 2009]: 5–7 – high-Mg (picrite) rocks of the Norilsk region of the Siberian trap province: 5 – Gudchikhinsky formation, 6 – Tuklonsky formation, 7 – Nadezhdinsky formation, 8 – trapped melt inclusions in olivines from picrites of the Gudchikhinsky formation, 9 – calculated primary melt compositions for the Gudchikhinsky formation; 10–12 – volcanic rocks of the eastern part of the Norilsk region after [Krivolutskaya et al., 2018]: 10 – Tuklonsky formation, 11 – Nadezhdinsky formation, 12 – Morongovsky formation; 13–14 – intermediate lava formations of the Tunguska syncline after [Al'mukhamedov et al., 2004] with reference to the geodynamic stage: 13 – rift stage (Syverminsky, Gudchikhinsky, Tuklonsky, Nadezhdinsky formations), 14 – nappe stage (Morongovsky, Mokulaevsky, Kharaelakhsky, Kumchinsky, Samoyedsky formations).

По нормированному отношению $(La/Sm)_n$ породы делятся на две группы (Прил. 1, табл. 1.1): первую со значениями в интервале 1.72–2.08 представляют в основном базиты Волочанской площади (центр ЕХП), во вторую со значениями 3.23–3.82 попадают базиты Рыбинской и Хабейской скважин (восток и запад ЕХП соответственно). По отношению $(Gd/Yb)_n$ породы первой и второй группы также явно различаются: 1.50–1.62 и 1.80–1.92 соответственно.

Сравнение геохимических характеристик исследуемых пород с опубликованными данными, приведенное на рис. 9 и 10, не дает однозначного ответа на вопрос о геодинамической специфике пород. Например, выделенные группы А и, отчасти, В подобны по РЗЭ

геохимии друг другу и одновременно базитам туклонской (рифтогенной) и моронговской (платформенной) свит восточной части Норильского района [Krivolutskaya et al., 2018], РЗЭ-спектры которых идентичны (см. рис. 9, а), а также всех их объединяет наличие положительной аномалии по Sr и отрицательной аномалии P, Nb, Ta, Th. Однако базиты туклонской и моронговской свит характеризуются слабой положительной Eu и отрицательной Ti аномалией, как и таймырские базиты группы А в классификации [Reichow et al., 2016] (см. рис. 9, в), и отсутствием аномалий Zr и Y, тогда как исследуемые нами породы обладают отрицательной Eu аномалией, положительными аномалиями по Zr, Y и Ti (рис. 10). РЗЭ-спектры исследуемых базитов

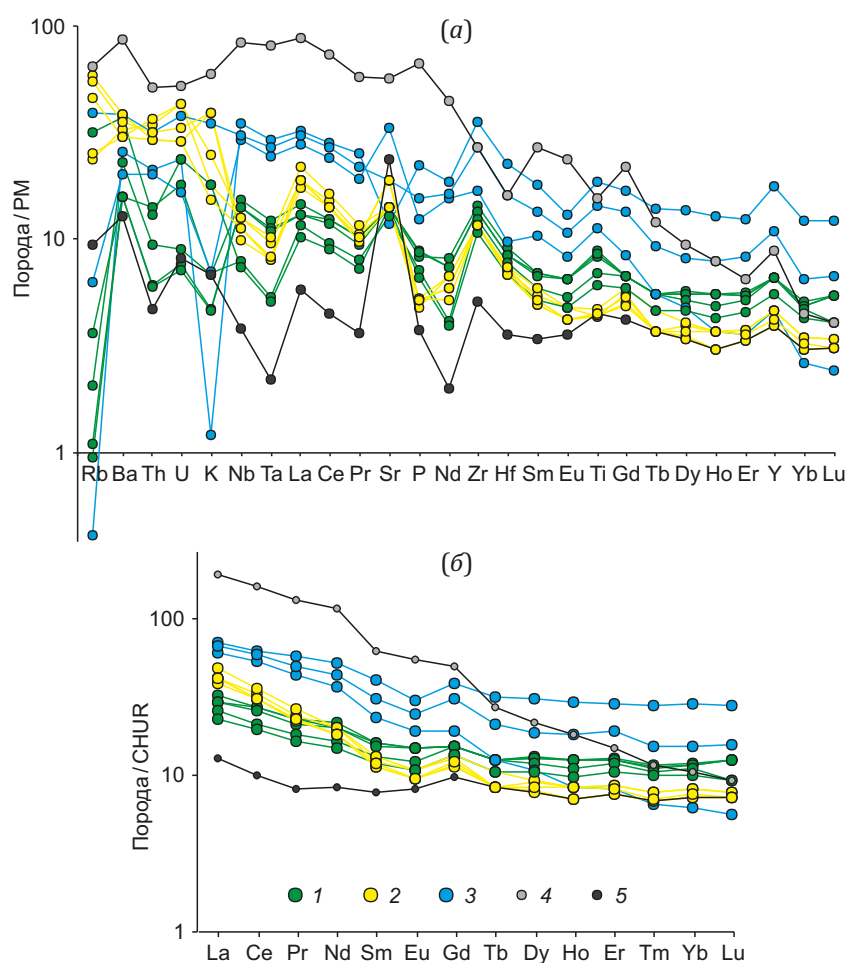


Рис. 8. Спайдер-диаграмма и спектры распределения редких элементов базитов ЕХП.

Цветом выделены образцы со сходными геохимическими характеристиками. Концентрации элементов в породах нормированы к примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989] (а) и к хондриту C1 [Boynnton, 1984] (б). 1 – геохимическая группа А (зеленые спектры) (обр. Г-1-1, В-1-1, В-2-2, В-2-2а, Хор-1-1); 2 – геохимическая группа В (желтые спектры) (обр. Х-2-1, Х-2-2, Р-1-1, Р-1-2, Р-1-3); 3 – геохимическая группа С (синие спектры) (обр. Х-1-1, В-2-1, Хор-1-2); 4 – обр. Р1-4; 5 – обр. Х3-1. Буквенные обозначения в номерах образцов соответствуют площадям: Г – Гольчихинская, Х – Хабейская, В – Волочанская, Р – Рыбинская, Хор – Хорудалахская.

Fig. 8. Spider diagram and distribution spectra of rare elements of the YKP mafic rocks.

Samples with similar geochemical characteristics are highlighted in color. Concentrations of elements in rocks are normalized to the primitive mantle [Sun, McDonough, 1989] (a) and to the C1 chondrite [Boynnton, 1984] (b). 1 – geochemical group A (green spectra) (samples Г-1-1, В-1-1, В-2-2, В-2-2а, Хор-1-1); 2 – geochemical group B (yellow spectra) (Х-2-1, Х-2-2, Р-1-1, Р-1-2, Р-1-3); 3 – geochemical group C (blue spectra) (Х-1-1, В-2-1, Хор-1-2); 4 – Р1-4; 5 – Х3-1. The letter designations in the sample numbers correspond to the areas: Г – Golchikhinsky, Х – Khabeisky, В – Volochansky, Р – Rybinsky, Хор – Khorudalakhsky.

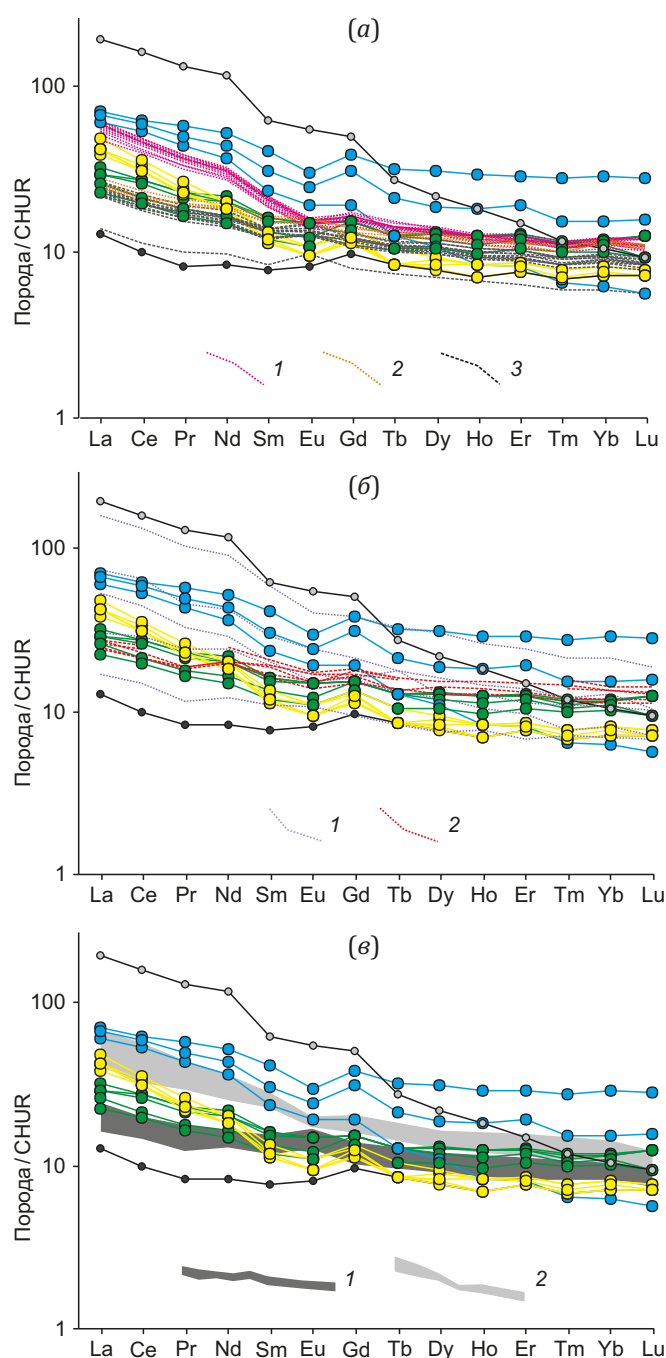


Рис. 9. Сравнение спектров РЗЭ базитов ЕХП с опубликованными данными по составам траппов Норильского, Тунгусского и Южно-Таймырского районов.

(а) – сравнение с вулканическими породами восточной части Норильского района по данным [Krivolutskaya et al., 2018]: 1 – надеждинская свита, 2 – туклонская свита, 3 – моронговская свита. (б) – сравнение со средними составами лавовых свит Тунгусской синеклизы по данным [Al'mukhamedov et al., 2004] с привязкой к геодинамическому этапу: 1 – рифтогенный этап (сыверминская, гудчихинская, туклонская, надеждинская свиты), 2 – покровный этап (моронговская, мокулаевская, хараелакская, кумчинская, самоедская свиты). (в) – сравнение с вулканическими и гипабиссальными породами Южно-Таймырского пояса: 1 – группа А (интрузивы), 2 – группа В (в основном эффузивы) по классификации [Reichow et al., 2016]. Обозначения базитов ЕХП см. на рис. 8. Концентрации РЗЭ нормированы на хондрит C1 по [Boynton, 1984].

Fig. 9. Comparison of REE distributions of basic rocks of the YKT with the published data on the Siberian traps.

(a) – comparison with volcanic rocks of the eastern part of the Norilsk region after [Krivolutskaya et al., 2018]: 1 – Nadezhdinsky formation, 2 – Tuklonsky formation, 3 – Morongovsky formation; (б) – comparison with the intermediate lava formations of the Tunguska syncline after [Al'mukhamedov et al., 2004] with reference to the geodynamic stage: 1 – rift stage (Syverminsky, Gudchikhinsky, Tuklonsky, Nadezhdinsky formations), 2 – nappe stage (Morongovsky, Mokulaevsky, Kharaelakhsky, Kumchinsky, Samoyedsky formations); (в) – comparison with volcanic and hypabyssal rocks of the South Taimyr belt: 1 – group A (intrusive rocks), 2 – group B (mainly effusives) after [Reichow et al., 2016]. See Fig. 8 for designations of the YKT mafic rocks. REE concentrations are normalized to C1 chondrite after [Boynton, 1984].

группы В подобны по форме РЗЭ-спектрам пород рифтогенной надеждинской свиты, но характеризуются более низкими концентрациями РЗЭ.

Форма и положение мультиэлементных спектров базитов групп А и В Енисей-Хатангского прогиба также

отчасти подобны спектрам базитов покровного этапа Тунгусской синеклизы в области совместимых и умеренно несовместимых элементов, но отличаются от них наличием упомянутых выше геохимических аномалий Ti, Y, Zr. Базиты группы В Енисей-Хатангского прогиба

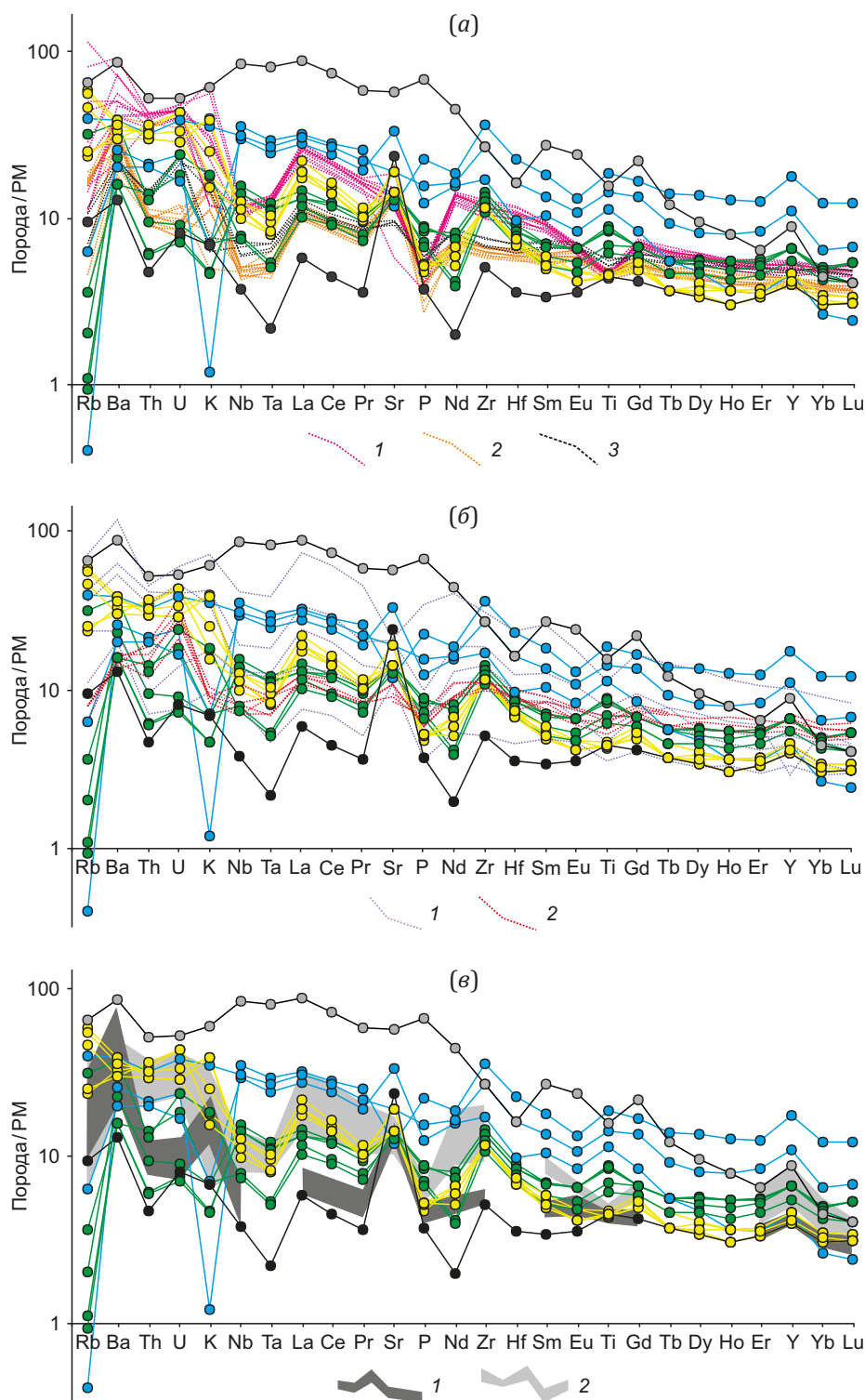


Рис. 10. Сравнение геохимических характеристик базитов ЕХП с составами траппов Норильского (а), Тунгусского (б) и Южно-Таймырского (в) районов на мультиэлементных диаграммах. Условные обозначения см. на рис. 8 и 9.

Fig. 10. Comparison of the geochemical characteristics of the basites of the YKT with the compositions of the traps of the Norilsk (a), Tunguska (b) and South Taimyr (c) regions on multi-element diagrams. See Fig. 8 and 9 for legend.

по уровню концентраций редких элементов, по форме и положению их спектров и по характеру геохимических аномалий наиболее близки вулканическим и гипабиссальным породам группы В Южного Таймыра [Reichow et al., 2016] (рис. 10, в). Частично последним подобны и базиты группы А ЕХП в области совместных и несовместимых элементов от Nb до Lu, но отличаются характером Ti аномалии (рис. 10, в).

Геохимия базитов группы С Енисей-Хатангского прогиба наиболее сильно отличается как от двух других групп базитов ЕХП (А и В), так и от всех базитов восточной части Норильского района, Тунгусской синеклизы и Южного Таймыра (см. рис. 8, 9; рис. 10).

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные геохимические характеристики базальтов и построенная сейсмогеологическая модель представляют новую информацию, которая может быть использована для реконструкции пермско-триасового этапа тектономагматической эволюции в пределах прогиба, занимающего промежуточную область между Сибирской платформой и Таймырским складчатым поясом.

Базальтовые породы, относящиеся к отдельному магматическому импульсу, как правило, характеризуются однородным составом, тогда как разные тела в одном и том же регионе могут сильно различаться по составу основных элементов (например, комплексы с высоким и низким содержанием TiO_2 , разной магнезиальности), содержанию микроэлементов и соотношениям радиогенных изотопов [Xiao et al., 2004]. Присутствие геохимически разнообразных образований в различных пространственных и стратиграфических позициях традиционно интерпретируется как отражение либо плавления единого мантийного источника при изменении РТ-условий, либо вклада нескольких дискретных мантийных источников [Kamenetsky et al., 2012].

Большое разнообразие геохимического состава характеризует набор пород из участков ЕХП, рассматриваемых в настоящей работе. При этом по стратиграфическому положению и площади отбора не наблюдается закономерностей – образцы, относящиеся к одной группе, отобраны из разных скважин, находящихся на значительном удалении друг от друга, а образцы из разных групп могут находиться в одной скважине и иметь близкую глубину отбора (см. рис. 2). Так, в западной области прогиба (скв. Гольчихинская и Хабейская) присутствуют вулканыты всех трех геохимических типов. В этом же кластере обнаружен наиболее магнезиальный (8.9 мас. % MgO) и высокотитанистый ($Ti/Y = 700$) образец из скв. Хабейская-1 (обр. X1-1).

Низкотитанистые базиты попадают как в эффузивные (в отложениях P_3-T_1 возраста), так и в интрузивные образования (в отложениях перми) скв. Рыбинской (восток ЕХП). В наиболее глубоких интрузиях центральной и восточной области определено присутствие высокотитанистых долеритов (Рыбинская и Хорудалахская скважины).

Полученные данные о содержании главных и редких элементов в базитах ЕХП можно сравнить с известными характеристиками базитов Норильского рудного района [Krivolutskaya et al., 2018], Тунгусской синеклизы [Al'mukhamedov et al., 2004] и Южно-Таймырского складчатого пояса [Reichow et al., 2005, 2016], представляющих южное и северное обрамление прогиба соответственно. Согласно сводному разрезу вулканических пород трапповой формации северной части Сибирской платформы (районы Норильский, Маймеча-Котуйский, Нижнетунгусский и Путорана) они разделяются на рифтогенные и платформенные (или покровные, пострифтовые) в соответствии с предполагаемой систематикой в [Al'mukhamedov et al., 2004; Krivolutsкая et al., 2018, и ссылки в данных работах]. Первые относятся к высокотитанистым породам нижней стратиграфической последовательности, вторые – к низкотитанистым верхней стратиграфической серии [Ivanov et al., 2013; Callegaro et al., 2021]. Базиты Южно-Таймырского пояса подразделяются на две группы по содержанию магния, по редкоэлементному и по изотопному составу – на интрузивные (1) и преимущественно эффузивные (2) согласно данным [Reichow et al., 2016].

Низкотитанистый тип толеитовых базальтовых магм ЕХП по составу наиболее близок к надеждинским магмам. Высокотитанистые, но менее магнезиальные магмы, обнаруженные в четырех образцах базитов ЕХП, можно отнести к вулканитам ивакинской свиты Норильского узла.

Сравнение позволяет рассматривать изученные базиты ЕХП группы В как аналоги низкотитанистых магм надеждинского типа Норильского района Сибирской КМП, но в сравнении с составами вулканических формаций Норильского района магнезиальность базитов ЕХП оказалась ниже (см. рис. 5). Базиты группы С могут рассматриваться в качестве аналогов высокотитанистых базальтов (обр. P1-4, B2-1, Xop1-2 и X1-1 из Рыбинской и Хабейской площадей ЕХП). Базиты группы А занимают промежуточное положение между В и С (см. рис. 5).

Геохимические характеристики магм ЕХП по отношению $Gd/Yb_n - La/Sm_n$ совпадают с базальтами Южно-Таймырского пояса подгруппы (2) с типичными отношениями $La/Sm_n \sim 1.7-2.0$ [Reichow et al., 2016]. Вместе с тем по этому показателю среди базитов ЕХП выделяется группа тел с повышенным отношением $La/Sm_n \sim 3.5-3.8$ и $Gd/Yb_n = 1.8-1.9$, которые совпадают с подобными характеристиками надеждинских лав Норильского района [Callegaro et al., 2021].

Нерешенным вопросом остается пермско-триасовый этап формирования ЕХП и роль базитового андерплейтинга в дестабилизации коры и мантийной литосферы на северной окраине Сибирской платформы. Отсутствие характерных для рифтов сбросов ступенчатого типа и полуграбенов, наряду с сохранностью всего рифейско-палеозойского платформенного осадочного чехла, не позволяет однозначно установить механизм

формирования прогиба на рубеже перми и триаса и рассматривать ЕХП в качестве развитого спредингового бассейна. Однако имеется ряд признаков, указывающих на режим растяжения в этот временной период. К ним относятся аномально высокий региональный тепловой поток на рубеже перми и триаса в восточной части прогиба 75–78 мВт/м² на фоне 45–48 мВт/м² в позднепалеозойское и мезозойское время [Larichev et al., 2024]. Кроме того, в западной части ЕХП на сейсмическом профиле выделяется узкая зона в интервале 240–380 км (см. рис. 3), где наблюдается резкое сокращение мощности отложений Р₃-Т₁ от депозцентра бассейна к периферии указанного интервала. Подобная картина погружения в бассейнах рифтового типа с наличием краевых (hinge) зон со значительными градиентами мощностей на боковых склонах описана для ряда осадочных бассейнов [Einsele, 2000, и ссылки в данной работе]. На рис. 11 приведены модели развития рифтов, демонстрирующие различия в эволюции погружения при длительности рифтогенеза от «мгновенного» (рис. 11, а, модель [McKenzie,

1978]) до продолжительного в течение 5, 20, 50 млн лет (рис. 11, б, в, г) [Cochran, 1983]. В всех случаях наблюдаются краевые зоны с резким увеличением мощности осадконакопления в направлении от борта к оси бассейна, аналогичные наблюдаемым в пермско-триасовых отложениях ЕХП (см. рис. 3).

Таким образом, по-видимому, нельзя рассматривать ЕХП как зрелый рифтовый бассейн, в котором спрединг привел к значительному утонению коры и литосферы, широкому раздвигу и формированию пассивных окраин. Если расстояние между противоположными краевыми зонами в западной части ЕХП (шириной около 180 км, см. рис. 3) считать за максимальную финальную ширину области растяжения, то с учетом уменьшения глубины осадочного чехла к востоку растяжению в короткий временной интервал Р₃-Т₁ была подвергнута лишь западная часть бассейна (возможно, как продолжение рифтовых структур ЗСП). Строение коры этой части прогиба и положение петрологической границы Мохо остаются дискуссионными и требуют детальной интерпретации.

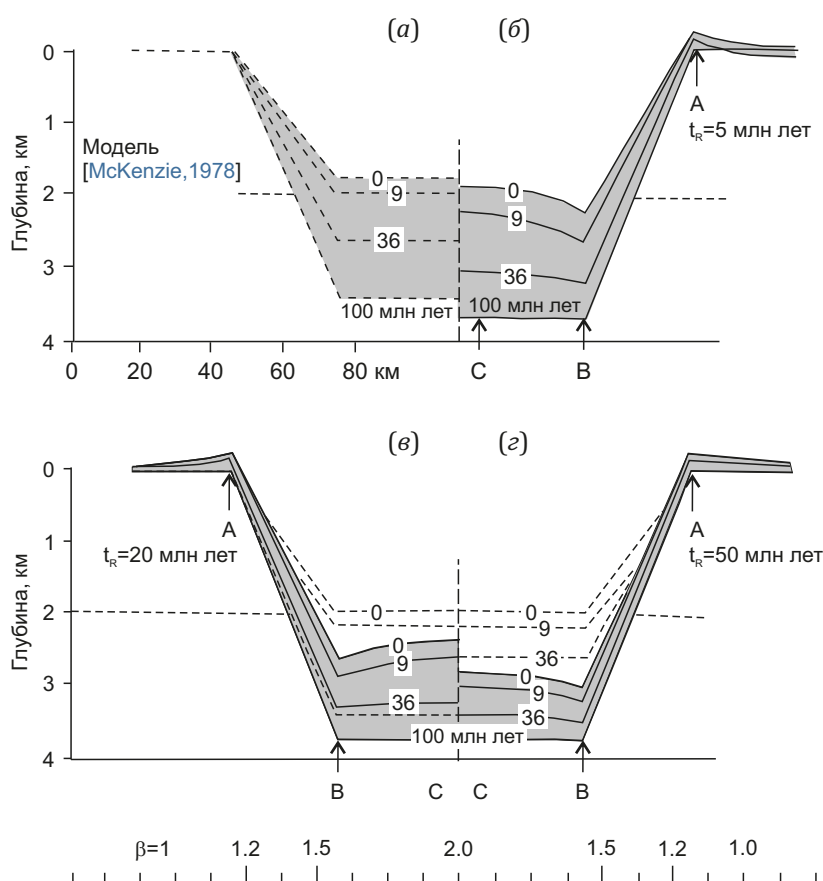


Рис. 11. Модели погружения в рифтовых впадинах при разной длительности рифтогенеза (по [Cochran, 1983]).

Интервалы А-В соответствуют краевым зонам с увеличением мощности осадконакопления от борта к оси бассейна. Коэффициент β (нижняя шкала), степень растяжения рифта с начальной шириной 80 км, меняется от 1.2–1.5 в краевых зонах до 2.0 в осевой.

Fig. 11. Models of subsidence in rift basins for different durations of rifting (after [Cochran, 1983]).

Intervals A-B correspond to marginal zones with an increase in sedimentation thickness from the margin to the axis of the basin. Coefficient β (lower scale), the degree of extension of the rift with an initial width of 80 km varies from 1.2–1.5 in the marginal zones to 2.0 in the axial zone.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые изучены образцы базитовых пород из скважин на площади Енисей-Хатангского прогиба, петрохимический и геохимический состав которых может использоваться для тектономагматических реконструкций.

Геохимические характеристики базитов, присутствующих в осадочном чехле ЕХП, соответствуют трем типам базитов, выделяемых в Сибирской КМП: низкотитанистым надеждинского типа, низкотитанистым моронговского типа и в ограниченном количестве – высокотитанистым базальтам «рифтового» этапа ивакинского типа. Изученные породы имеют сходные геохимические характеристики как с норильскими (южный фланг ЕХП), так и с таймырскими базитами (северный фланг ЕХП) и могут рассматриваться как составная часть Сибирской КМП.

Природа устанавливаемой по геофизическим данным аномальной области, выраженной в волновой картине на сейсмическом разрезе, в нижней коре и на границе кора – мантия непосредственно под депоцентром ЕХП остается неопределенной. На сейсмическом разрезе зона характеризуется контрастно выраженной «рассеянной» хаотичной волновой картиной с отсутствием амплитудных отражающих границ.

8. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензентов д.г.-м.н. А.В. Иванова и д.г.-м.н. А.Я. Медведева за полезные критические замечания и комментарии, способствовавшие улучшению статьи.

9. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

10. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

11. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Afanasenkov A.P., 2019. Geology and Oil and Gas Prospects of the North of the Siberian Platform. PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Moscow, 375 p. (in Russian) [Афанасенков А.П. Геология и перспективы нефтегазоносности севера Сибирской платформы: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. М., 2019. 375 с].

Afanasenkov A.P., Lygin I.V., Obukhov A.N., Sokolova T.B., Kuznetsov K.M., 2017. Volumetric Reconstruction of the Yenisei-Khatanga Rift System's Tectonic Elements by Integrated Geological-Geophysical Interpretation. *Geophysics* 2,

60–70 (in Russian) [Афанасенков А.П., Лыгин И.В., Обухов А.Н., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М. Объемная реконструкция тектонических элементов Енисей-Хатангской рифтовой системы по результатам комплексной геолого-геофизической интерпретации // *Геофизика*. 2017. № 2. С. 60–70].

Afanasenkov A.P., Unger A.V., Lugovaya O.V., Chikishev A.A., Nikishin A.M., Bordunov S.I., Yakovishina E.V., 2016. The Tectonics and Stages of the Geological History of the Yenisei-Khatanga Basin and the Conjugate Taimyr Orogeny. *Geotectonics* 50, 161–178. <https://doi.org/10.1134/S0016852116020023>.

Al'mukhamedov A.I., Medvedev A.Y., Zolotukhin V.V., 2004. Chemical Evolution of the Permian-Triassic Basalts of the Siberian Platform in Space and Time. *Petrology* 12 (4), 297–311.

Augland L.E., Ryabov V.V., Vernikovskiy V.A., Planke S., Polozov A.G., Callegaro S., Jerram D.A., Svensen H.H., 2019. The Main Pulse of the Siberian Traps Expanded in Size and Composition. *Scientific Reports* 9, 18723. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54023-2>.

Boynnton W.V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. *Rare Earth Element Geochemistry. Developments in Geochemistry* 2, 63–114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>.

Callegaro S., Svensen H.H., Neumann E.R., Polozov A.G., Jerram D.A., Deegan F.M., Planke S., Shiganova O.V., Ivanova N.A., Melnikov N.V., 2021. Geochemistry of Deep Tunguska Basin Sills, Siberian Traps: Correlations and Potential Implications for the End-Permian Environmental Crisis. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 176, 49. <https://doi.org/10.1007/s00410-021-01807-3>.

Cochran J.R., 1983. Effect of Finite Rifting Times on the Development of Sedimentary Basins. *Earth and Planetary Science Letters* 66, 289–302. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90142-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90142-5).

Database of State Geological Maps (GIS Atlas "Subsoil of Russia"). Information Resources of VSEGEI (in Russian) [База данных государственных геологических карт (ГИС-Атлас «Недра России»). Информационные ресурсы ВСЕГЕИ]. Available from: <https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/webmapget/index.php> (Last Accessed September 19, 2023).

Dobretsov N.L., 1997. Permian-Triassic Magmatism and Sedimentation in Eurasia as a Result of a Superplume. *Doklady of the Russian Academy of Sciences. Earth Science Sections* 354 (4), 497–501.

Dobretsov N.L., Polyansky O.P., Reverdatto V.V., Babihev A.V., 2013. Dynamics of the Arctic and Adjacent Petroleum Basins: A Record of Plume and Rifting Activity. *Russian Geology and Geophysics* 54 (8), 888–902. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.009>.

Dobretsov N.L., Vernikovskiy V.A., 2001. Mantle Plumes and Their Geologic Manifestations. *International Geology Review* 43 (9), 771–787. <https://doi.org/10.1080/00206810109465047>.

Einsele G., 2000. Chapter 8. Subsidence. In: *Sedimentary Basins. Evolution, Facies, and Sediment Budget*. Springer,

Berlin, Heidelberg, p. 387–413. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04029-4_8.

Elkins Tanton L.T., Hager B.H., 2000. Melt Intrusion as a Trigger for Lithospheric Foundering and the Eruption of the Siberian Flood Basalt. *Geophysical Research Letters* 27 (23), 3937–3940. <https://doi.org/10.1029/2000GL011751>.

Ernst R.E., 2014. Large Igneous Provinces. Cambridge University Press, London, 653 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139025300>.

Fedorenko V.A., Lightfoot P.C., Naldrett A.J., Czamanske G.K., Hawkesworth C.J., Wooden J.L., Ebel D.S., 1996. Petrogenesis of the Floodbasalt Sequence at Noril'sk, North Central Siberia. *International Geology Review* 38 (2), 99–135. <https://doi.org/10.1080/00206819709465327>.

Gunduz M., Asan K., 2021. PetroGram: An Excel-Based Petrology Program for Modeling of Magmatic Processes. *Geoscience Frontiers* 12 (1), 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.06.010>.

Irvine T.N., Baragar W.R.A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8 (5), 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>.

Ivanov A.V., 2015. Why Volatiles Are Required for Cratonic Flood Basalt Volcanism: Two Examples from the Siberian Craton. In: G.R. Foulger, M. Lustrino, S.D. King (Eds), *The Interdisciplinary Earth: A Volume in Honor of D.L. Anderson*. Geological Society of America Special Paper 514, 325–338. [https://doi.org/10.1130/2015.2514\(19\)](https://doi.org/10.1130/2015.2514(19)).

Ivanov A.V., He H., Yan L., Ryabov V.V., Shevko A.Y., Paleskii S.V., Nikolaeva I.V., 2013. Siberian Traps Large Igneous Province: Evidence for Two Flood Basalt Pulses around Permo-Triassic Boundary and in the Middle Triassic, and Contemporaneous Granitic Magmatism. *Earth-Science Reviews* 122, 58–76. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.001>.

Ivanov A.V., Mukasa S.B., Kamenetsky V.S., Ackerson M., Demonterova E.I., Pokrovsky B.G., Vladykin N.V., Kolesnichenko M.V., Litasov K.D., Zedgenizov D.A., 2018. Volatile Concentrations in Olivine-Hosted Melt Inclusions from Meimechite and Melanephelinite Lavas of the Siberian Traps Large Igneous Province: Evidence for Flux-Related High-Ti, High-Mg Magmatism. *Chemical Geology* 483, 442–462. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.03.011>.

Kamenetsky V.S., Chung S.-L., Kamenetsky M.B., Kuzmin D.V., 2012. Picrites from the Emeishan Large Igneous Province, SW China: a Compositional Continuum in Primitive Magmas and Their Respective Mantle Sources. *Journal of Petrology* 53 (10), 2095–2113. <https://doi.org/10.1093/petrology/egs045>.

Kazais V.I., Yagantsev E.M., 1971. The Method for Quantitative Interpretation of Gravitational and Magnetic Anomalies in the Yenisei-Khatanga Trough. *Russian Geology and Geophysics* 2, 25–30 (in Russian) [Казаис В.И., Яганцев Э.М. Методика количественной интерпретации гравитационных и магнитных аномалий в Енисей-Хатангском прогибе // Геология и геофизика. 1971. № 2. С. 25–30].

Kirdyashkin A.A., Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.G., Gladkov I.N., Surkov N.V., 2005. Hydrodynamic Processes Associated with Plume Rise and Conditions for Eruption Conduit Formation. *Russian Geology and Geophysics* 46 (9), 891–907.

Kontorovich V.A., 2011. Tectonics and Oil and Gas Potential of the Western Part of the Yenisei-Khatanga Regional Trough. *Russian Geology and Geophysics* 52 (8), 804–824. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.07.006>.

Kontorovich V.A., Filippov Y.F., 2021. Formation Conditions and Geological Structure of the Yenisei-Khatanga Regional Trough. *Russian Journal of Geophysical Technologies* 4, 16–25 (in Russian) [Конторович В.А., Филиппов Ю.Ф. Условия формирования и геологическое строение Енисей-Хатангского регионального прогиба // Геофизические технологии. 2021. № 4. С. 16–25]. <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2021-4-16>.

Kostyuchenko S.L., 2000. Structure of the Crust and Surface Mechanisms of Formation of Near-Arctic Continental Sedimentary Basins in Siberia. *Regional Geology and Metallogeny* 10, 125–135.

Krivolutskaya N.A., Roshchina I.A., Kononkova N.N., Svirskaya N.M., Romashova T.V., Kuzmin D.V., Gongalsky B.I., 2018. Stages of Trap Magmatism in the Norilsk Area: New Data on the Structure and Geochemistry of the Volcanic Rocks. *Geochemistry International* 56, 419–437. <https://doi.org/10.1134/S0016702918050026>.

Kurapov M., Ershova V., Khudoley A., Luchitskaya M., Stockli D., Makariev A., Makarieva E., Vishnevskaya I., 2021. Latest Permian – Triassic Magmatism of the Taimyr Peninsula: New Evidence for a Connection to the Siberian Traps Large Igneous Province. *Geosphere* 17 (6), 2062–2077. <https://doi.org/10.1130/ges02421.1>.

Kushnir D.G., 2016. Pre-Yenisei Area of Taimyr and Gydan Peninsulas – Deep Seated Geological Structure and Petroleum Potential Prospects. *Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies* 11 (1), 1–29 (in Russian) [Кушнир Д.Г. Глубинное геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Приенисейской полосы Таймыра и Гыдана // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2016. Т. 11. № 1. С. 1–29]. <https://doi.org/10.17353/2070-5379/6.2016>.

Kushnir D.G., 2018. Geodynamics of the Taimyr Peninsula from Geophysical Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (1), 81–92 (in Russian) [Кушнир Д.Г. Геодинамика полуострова Таймыр по геофизическим данным // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 1. С. 81–92]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0338>.

Larichev A.I., Bostrikov O.I., Khabarov A.N., 2024 (in press). Conditions of Oil and Gas Formation, Formation and Destruction of Hc Accumulations and Forecast of Oil and Gas Bearing Capacity in Permian Sediments of the Eastern-Taimyr License Area (Anabar-Khatanga Area). *Russian Geology and Geophysics*. <https://doi.org/10.15372/GiG2024101>.

Latyshev A.V., Fetisova A.M., Veselovskiy R.V., 2020. Linking Siberian Traps Lip Emplacement and End-Permian Mass Extinction: Evidence from Magnetic Stratigraphy of the

Maymecha-Kotuy Volcanic Section. *Geosciences* 10 (8), 295. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080295>.

Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., 1986. Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology* 27 (3), 745–750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>.

Lightfoot P.C., Hawkesworth C.J., Hergt J., Naldrett A.J., Gorbachev N.S., Fedorenko V.A., Doherty W., 1993. Remobilisation of the Continental Lithosphere by Mantle Plumes: Major-, Trace-Element and Sr-, Nd-, and Pb-Isotope Evidence from Picritic and Tholeiitic Lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 114, 171–188. <https://doi.org/10.1007/BF00307754>.

McKenzie D., 1978. Some Remarks on the Development of Sedimentary Basins. *Earth and Planetary Science Letters* 40 (1), 25–32. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90071-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90071-7).

Medvedev A.Y., Al'mukhamedov A.I., Kirida N.P., 2003. Geochemistry of Permo-Triassic Volcanic Rocks of West Siberia. *Russian Geology and Geophysics* 44 (1–2), 86–100.

Nikishin A.M., Sobornov K.O., Prokopyev A.V., Frolov S.V., 2010. Tectonic Evolution of the Siberian Platform during the Vendian and Phanerozoic. *Moscow University Geology Bulletin* 45, 1–16. <https://doi.org/10.3103/S0145875210010011>.

Pearce J.A., Norry M.J., 1979. Perogenetic Implications of Ti, Zn, Y and Nb Variations in Volcanic Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 69, 33–47. <https://doi.org/10.1007/BF00375192>.

Priestley K., McKenzie D., 2013. The Relationship between Shear Wave Velocity, Temperature, Attenuation and Viscosity in the Shallow Part of the Mantle. *Earth and Planetary Science Letters* 381, 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.08.022>.

Reference Geological and Geophysical Profiles of Russia, 2013. Deep Seismic Sections along the DSS Profiles Performed from 1972 to 1995. Atlas. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 94 p. (in Russian) [Опорные геолого-геофизические профили России. Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год: Атлас. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2013. 94 с.]. Available from: <https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/seismic/> (Last Accessed September 19, 2023).

Reichow M.K., Saunders A.D., Scott R.A., Millar I.L., Barford D., Pringle M.S., Rogers N.W., Hammond S., 2016. Petrogenesis and Timing of Mafic Magmatism, South Taimyr, Arctic Siberia: A Northerly Continuation of the Siberian Traps? *Lithos* 248–251, 382–401. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.01.018>.

Reichow M.K., Saunders A.D., White R.V., Al'mukhamedov A.I., Medvedev A.I., 2005. Geochemistry and Petrogenesis of Basalts from the West Siberian Basin: An Extension of the Permo-Triassic Siberian Traps, Russia. *Lithos* 79 (3–4), 425–452. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.011>.

Smirnov Ya.B. (Ed.), 1980. The Heat Flow Map of the USSR and Adjacent Areas. Scale 1:10000000. Main Department of Geodesy and Cartography, Moscow, 1 sheet (in

Russian) [Карта теплового потока территории СССР и сопредельных районов. Масштаб 1:10000000 / Ред. Я.Б. Смирнов. М.: ГУГК, 1980. 1 л.].

Sobolev A.V., Krivolutsкая N.A., Kuzmin D.V., 2009. Petrology of the Parental Melts and Mantle Sources of Siberian Trap Magmatism. *Petrology* 17, 253–286. <https://doi.org/10.1134/S0869591109030047>.

Sobolev S.V., Sobolev A.V., Kuzmin D.V., Krivolutsкая N.A., Petrunin A.G., Arndt N.T., Radko V.A., Vasiliev Y.R., 2011. Linking Mantle Plumes, Large Igneous Provinces and Environmental Catastrophes. *Nature* 477, 312–316. <https://doi.org/10.1038/nature10385>.

Staroseltsev V.S., 2008. Actual Problems of Tectonics of Oil and Gas Promising Regions. Nauka, Novosibirsk, 212 p. (in Russian) [Старосельцев В.С. Актуальные проблемы тектоники нефтегазоперспективных регионов. Новосибирск: Наука, 2008. 212 с.].

Sun S.-S., McDonough W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society of London Special Publications* 42 (1), 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>.

Surkov V.S., Smirnov L.V., Zhero O.G., 1987. Early Mesozoic Rifting and Its Influence on the Lithosphere Structure of the West Siberian Plate. *Russian Geology and Geophysics* 9, 3–11 (in Russian) [Сурков В.С., Смирнов Л.В., Жеро О.Г. Раннемезозойский рифтогенез и его влияние на структуру литосферы Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. 1987. № 9. С. 3–11].

Vernikovskiy V.A., Polyansky O.P., Babichev A.B., Vernikovskaya A.E., Proskurnin V.F., Matushkin N.Yu., 2022. Tectonothermal Model for the Late Paleozoic Syncollisional Formation Stage of the Kara Orogen (Northern Taimyr, Central Arctic). *Russian Geology and Geophysics* 63 (4), 368–382. <https://doi.org/10.2113/RGG20214426>.

Vernikovskiy V., Shemin G., Deev E., Metelkin D., Matushkin N., Pervukhina N., 2018. Geodynamics and Oil and Gas Potential of the Yenisei-Khatanga Basin (Polar Siberia). *Minerals* 8 (11), 510. <https://doi.org/10.3390/min8110510>.

Votyakov S.L., Kiseleva D.V., Shagalov E.S., Cherednichenko N.V., Deryugina L.K., Denisov S.A., Chempalov A.P., Uzkikh S.E., Orekhov A.A., 2006. Multi-Element Analysis of Geological Samples by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry on ELAN 9000. In: Yearbook 2005. IGG UB RAS, Ekaterinburg, p. 425–430 (in Russian) [Вотьяков С.Л., Киселева Д.В., Шагалов Е.С., Чередниченко Н.В., Дерюгина Л.К., Денисов С.А., Чемпалов А.П., Узких С.Э., Орехов А.А. Мультиэлементный анализ геологических образцов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на ELAN 9000 // Ежегодник-2005. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. С. 425–430].

Winchester J.A., Floyd P.A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology* 20, 325–343. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2).

Wooden J.L., Czamanske G.K., Fedorenko V.A., Arndt N.T., Chauvel C., Bouse R.M., King B.W., Knight R.J., Siems D.F.,

1993. Isotopic and Trace-Element Constrains on Mantle and Crustal Contributions to Siberian Continental Flood Basalts, Noril'sk Area, Siberia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57 (5), 3677–3704. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90149-Q](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90149-Q).

Xiao L., Xu Y.G., Mei H.J., Zheng Y.F., He B., Pirajno F., 2004. Distinct Mantle Sources of Low-Ti and High-Ti Basalts from the Western Emeishan Large Igneous Province, SW China: Implications for Plume-Lithosphere Interaction. *Earth and*

Planetary Science Letters 228 (3–4), 525–546. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.10.002>.

Zolotukhin V.V., Vasiliev Yu.R., Dyuzhikov O.A., 1989. Trap Diversity and Initial Magmas (on the Example of the Siberian Platform). Nauka, Novosibirsk, 248 p. (in Russian) [Золотухин В.В., Васильев Ю.Р., Дюжиков О.А. Многообразие траппов и исходные магмы (на примере Сибирской платформы). Новосибирск: Наука, 1989. 248 с.].

Таблица 1.1. Состав главных и редких элементов эффузивов и базитовых интрузий в осадочном чехле ЕХП в северном обрамлении Сибирской платформы**Table 1.1.** Major and trace element compositions of volcanic rocks and mafic intrusions in the sedimentary cover of the YKT in the northern margin of the Siberian Platform

№ обр	B1-1	B2-1	B2-2	B2-2a	Г1-1	X1-1	X2-1	X2-2	X3-1	Xop1-1*	Xop1-2*	P1-1	P1-2*	P1-3*	P1-4*
SiO ₂	46.56	44.16	45.85	46.12	47.97	47.79	49.89	50.47	41.97	48.07	47.72	51.28	51.62	51.53	47.65
TiO ₂	1.81	4.01	1.91	1.86	1.50	2.45	0.94	1.01	0.97	1.33	3.09	0.94	0.96	0.98	3.38
Al ₂ O ₃	14.85	12.21	14.93	14.68	15.10	11.17	15.42	15.08	14.21	14.98	12.13	15.19	15.29	15.30	13.24
Fe ₂ O ₃	12.56	19.58	13.35	12.88	13.53	13.67	10.25	10.45	9.68	13.14	17.68	10.01	10.50	10.46	14.40
MnO	0.17	0.33	0.21	0.18	0.20	0.22	0.14	0.13	0.24	0.19	0.23	0.15	0.16	0.16	0.20
MgO	7.23	4.72	6.81	7.36	6.72	8.91	6.99	7.23	6.89	7.40	4.71	6.61	6.96	6.76	4.25
CaO	10.93	7.52	11.30	11.53	10.89	9.51	11.66	10.02	16.76	10.40	8.76	11.07	10.71	10.52	8.43
Na ₂ O	2.46	4.02	2.32	2.26	2.25	2.17	1.85	1.73	1.92	2.33	2.71	2.38	2.15	2.35	2.93
K ₂ O	0.21	0.04	0.14	0.14	0.21	0.21	0.75	0.54	0.21	0.54	1.05	0.46	1.18	1.17	1.80
P ₂ O ₅	0.18	0.49	0.19	0.19	0.16	0.27	0.10	0.12	0.08	0.15	0.34	0.11	0.12	0.11	1.47
BaO	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.02	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.08
SO ₃	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.12	<0.03	0.11	<0.03	<0.03	<0.03	0.08
V ₂ O ₅	0.05	0.08	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.07	0.03	0.03	0.03	0.04
Cr ₂ O ₃	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.06	0.02	0.01	0.04	0.02	<0.01	0.03	0.03	0.02	<0.01
NiO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
П.п.п.	2.53	2.50	2.18	2.52	1.53	3.22	1.56	3.30	6.51	0.89	0.67	1.42	0.54	0.66	1.57
Сумма	99.62	99.72	99.31	99.84	100.14	99.76	99.67	100.23	99.67	99.56	99.30	99.77	100.31	100.11	99.54
Mg#	0.365	0.194	0.338	0.363	0.331	0.394	0.405	0.409	0.415	0.36	0.21	0.397	0.399	0.392	0.227
Li	1.6	4	1.3	1.6	1.4	4	4	8	2.7	5	4	5	5	4	4
Be	0.17	0.32	0.14	0.15	0.14	0.5	0.25	0.26	0.1	0.13	0.34	0.22	0.2	0.21	0.5
Sc	35	37	34	30	26	19	22	22	31	26	19	20	21	20	9
Co	33	31	35	33	33	40	29	29	31	36	35	25	26	26	21
Cu	90	180	90	80	100	140	20	19.1	80	120	120	60	37	39	27
Zn	100	180	100	90	170	120	80	80	60	100	150	70	80	80	150
Ga	15	17	15	14	15	17	14	14	13	15	19	12	12	12	18
Ge	1.2	1.2	1.1	1.1	1	1.3	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3	1	1	1	1.1
As	0.38	1.04	0.4	0.45	0.54	0.94	0.57	0.67	0.48	0.84	1.3	0.74	1.8	0.89	0.87

Таблица 1.1 (продолжение)

Table 1.1 (continued)

№ обр	B1-1	B2-1	B2-2	B2-2a	Г1-1	X1-1	X2-1	X2-2	X3-1	Xop1-1*	Xop1-2*	P1-1	P1-2*	P1-3*	P1-4*
Se	0.93	1.8	0.93	0.93	0.87	0.85	0.7	0.68	0.82	0.96	1.31	0.61	0.68	0.69	1.39
Rb	1.3	0.26	0.6	0.7	2.3	4	15	16	6	20	25	29	37	35	41
Sr	300	250	300	300	270	700	300	300	500	300	400	400	300	400	1200
Y	30	80	30	30	30	21	21	21	18	25	50	18	18	19	40
Zr	160	400	150	150	140	190	130	130	57	120	300	130	130	130	300
Nb	11	25	10	10	5.6	21	9	9	2.7	5.3	22	8	7	8	60
Mo	0.4	0.6	0.5	0.34	0.5	1	0.6	0.5	0.4	0.8	1.5	1.2	0.8	0.9	2.2
Ag	0.17	0.4	0.17	0.149	0.089	0.32	0.122	0.129	0.053	0.081	0.35	0.118	0.113	0.115	0.85
Cd	0.17	0.3	0.16	0.13	0.12	0.17	0.14	0.16	0.07	0.14	0.21	0.1	0.11	0.1	0.22
Sn	0.9	2	0.7	0.7	0.8	1.4	0.9	1	0.46	0.8	1.4	0.7	1	0.8	2
Sb	0.04	0.23	0.03	0.024	0.09	0.06	0.09	0.11	0.05	0.08	0.08	0.05	0.05	0.06	0.06
Te	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.015
Cs	0.057	0.054	0.14	0.09	0.25	0.06	0.17	0.5	0.25	1.1	0.6	0.9	1.3	1.1	1.1
Ba	160	180	110	110	110	140	230	210	90	260	270	210	270	250	600
La	10	22	9	9	8	19	13	15	4	7	21	13	12	13	60
Ce	22	50	22	21	17	43	27	29	8	16	48	25	25	25	130
Pr	2.8	7	2.8	2.6	2.2	5.3	2.9	3.2	1	2	6	2.8	2.7	2.8	16
Nd	12	31	13	12	10	22	12	12	5	9	26	11	11	11	70
Sm	3.1	8	3.1	3	2.6	4.6	2.4	2.6	1.5	2.3	6	2.2	2.2	2.3	12
Eu	1.1	2.2	1.1	1.1	0.9	1.4	0.8	0.8	0.6	0.8	1.8	0.7	0.7	0.7	4
Gd	4	10	4	4	4	5	3.3	3.5	2.5	3.5	8	3	2.9	3.2	13
Tb	0.6	1.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.5	0.4	0.5	1	0.4	0.4	0.4	1.3
Dy	4.1	10	4.2	4.1	3.8	3.5	2.9	3	2.5	3.4	6	2.6	2.5	2.7	7
Ho	0.9	2.1	0.9	0.9	0.8	0.6	0.6	0.6	0.5	0.7	1.3	0.5	0.5	0.6	1.3
Er	2.6	6	2.7	2.6	2.5	1.7	1.8	1.8	1.6	2.2	4	1.6	1.6	1.7	3.1
Tm	0.37	0.9	0.38	0.36	0.34	0.21	0.25	0.25	0.22	0.32	0.5	0.22	0.22	0.23	0.38
Yb	2.4	6	2.5	2.4	2.3	1.3	1.7	1.7	1.5	2.1	3.2	1.5	1.5	1.6	2.2

Таблица 1.1 (продолжение)

Table 1.1 (continued)

№ обр	B1-1	B2-1	B2-2	B2-2a	Г1-1	X1-1	X2-1	X2-2	X3-1	Xop1-1*	Xop1-2*	P1-1	P1-2*	P1-3*	P1-4*
Lu	0.4	0.9	0.4	0.4	0.3	0.18	0.25	0.25	0.23	0.3	0.5	0.23	0.23	0.23	0.3
Hf	2.8	7	2.6	2.6	2.4	3	2.2	2.3	1.1	2.1	5	2.2	2.1	2.3	5
Ta	0.5	1.2	0.46	0.45	0.22	1	0.39	0.42	0.09	0.21	1.1	0.33	0.33	0.34	3.3
W	0.04	0.21	0.17	0.06	0.11	0.17	0.3	0.3	0.09	0.15	0.24	0.3	0.4	0.3	0.6
Tl	0.008	0.004	0.0007	0.0005	0.005	0.016	0.06	0.06	0.015	0.11	0.05	0.12	0.12	0.14	0.1
Pb	1.8	2.9	1	1.3	1.8	4	5	4	1	2.3	2	4	6	6	5
Bi	<5.e-4	<5.e-4	<5.e-4	<5.e-4	<5.e-4	<5.e-4	<5.e-4	<5.e-4	<5.e-4	<5.e-4	<5.e-4	<5.e-4	<5.e-4	<5.e-4	<5.e-4
Th	0.8	1.8	0.52	0.51	1.2	1.7	2.9	3.1	0.4	1.1	2.7	2.5	2.5	2.7	4.4
U	0.19	0.5	0.16	0.15	0.38	0.35	0.9	0.9	0.17	0.5	0.8	0.6	0.6	0.7	1.1
(La/Sm)n	2.08	1.77	1.87	1.94	1.99	2.67	3.50	3.73	1.72	1.97	2.26	3.82	3.52	3.65	3.23
(Gd/Yb)n	1.55	1.55	1.49	1.55	1.62	3.59	1.81	1.92	1.56	1.56	2.33	1.87	1.81	1.87	5.52
La/Yb	4.17	3.67	3.60	3.75	3.48	14.62	7.65	8.82	2.67	3.33	6.56	8.67	8.00	8.13	27.27

Примечание. Оксиды даны в мас. %, элементы – в г/т; п.п.п. – потери при прокаливании (мас. %). Места отбора образцов показаны на [рис. 1](#). Образцы со звездочкой у номера – долериты, без звездочки – базальты. $Mg\# = (MgO/Aw_{MgO}) / [(MgO/Aw_{MgO}) + (85 \cdot (Fe_2O_3)/100 \cdot Aw_{Fe2O3})]$. Отношения (La/Sm)n и (Gd/Yb)n нормированы по [\[Sun, McDonough, 1989\]](#).

Note. Oxides are given in wt. %, elements – in ppm; п.п.п. – loss on ignition (wt. %). Sampling sites are shown in [Fig. 1](#). Samples whose numbers are marked with an asterisk are dolerites, those not marked with an asterisk are basalts. $Mg\# = (MgO/Aw_{MgO}) / [(MgO/Aw_{MgO}) + (85 \cdot (Fe_2O_3)/100 \cdot Aw_{Fe2O3})]$. The (La/Sm)n and (Gd/Yb)n ratios are normalized after [\[Sun, McDonough, 1989\]](#).