



## ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.838.5:550.8.053:550.849:551.215.4:552.2

EDN: ALWXDW

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-1-24-49

**Петрофизические исследования магматических  
и метаморфических комплексов Ольхонского  
геодинамического полигона****К.М. Константинов<sup>a,✉</sup>, Е.В. Скляр<sup>b</sup>, Л.Р. Косарева<sup>c</sup>, А.В. Лавренчук<sup>d</sup>,  
Е.В. Пушкарев<sup>e</sup>, Г.К. Константинов<sup>f</sup>, П.Н. Воробьева<sup>g</sup>, А.Е. Дугарова<sup>h</sup>,  
В.А. Перова<sup>i</sup>, Н.И. Пилипенко<sup>j</sup>, Е.А. Сиселятин<sup>k</sup>, Э.Б. Тулесонова<sup>l</sup>**<sup>a, f, i</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия<sup>b</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия<sup>c</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия<sup>d</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия<sup>e</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия<sup>g</sup>Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия<sup>h, j</sup>ООО «Сигма-Гео», Иркутск, Россия

**Резюме.** Целью исследования магматических и метаморфических комплексов Ольхонского региона являлась разработка петрофизической легенды для аэрокосмической геологической карты нового поколения как основы для интерпретации материалов геофизических съемок, геодинамических реконструкций и пр. Благодаря современной методике и оборудованию проведены полевые работы по отбору ориентированных образцов, лабораторные петрофизические и аналитические исследования. По рассмотренным объектам получены скалярные и векторные физические параметры (плотность, магнитная восприимчивость, векторы остаточной и суммарной намагниченности, коэффициент Кёнигсбергера), характеризующие их современное и древнее (палеомагнитное) состояние. Статистическая обработка первичных измерений показала, что изученные комплексы условно распадаются на два петромагнитных комплекса: слабо- и сильномагнитный. Поскольку базиты (долериты, габбро и беербахиты) второго петромагнитного комплекса могут оказаться перспективными объектами для геодинамических реконструкций, по ним были проведены рекогносцировочные геохимические, магнитоминералогические и палеомагнитные исследования. Основными минералом-носителем векторов естественной остаточной намагниченности в изученных образованиях является неизменный магнетит ( $Fe > 90\%$ ) с точкой Кюри около  $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В ходе проведенных в лабораторных условиях размагничиваний переменным магнитным полем и температурой рассмотренные геологические образования сохранили векторы характеристической естественной остаточной намагниченности, которые, возможно, будут использованы для палеогеодинамических реконструкций Ольхонского террейна.

**Ключевые слова:** Западное Прибайкалье, Ольхонский террейн, аэрокосмическая геологическая карта, петрофизическая легенда, ранний палеозой, магнетиты, палеомагнетизм

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках проектной деятельности студентов Иркутского национального исследовательского технического университета 2023–2024 гг.

**Для цитирования:** Константинов К.М., Скляр Е.В., Косарева Л.Р., Лавренчук А.В., Пушкарев Е.В., Константинов Г.К. [и др.]. Петрофизические исследования магматических и метаморфических комплексов Ольхонского геодинамического полигона // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 1. С. 24–49. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-24-49>. EDN: ALWXDW.



## GEOPHYSICS

### Original article

# Petrophysical studies of igneous and metamorphic complexes of the Olkhon geodynamic polygon

Konstantin M. Konstantinov<sup>a,✉</sup>, Evgeny V. Sklyarov<sup>b</sup>, Lina R. Kosareva<sup>c</sup>,  
Andrey V. Lavrenchuk<sup>d</sup>, Evgeny V. Pushkarev<sup>e</sup>, German K. Konstantinov<sup>f</sup>,  
Polina N. Vorobyeva<sup>g</sup>, Ayana E. Dugarova<sup>h</sup>, Veronika A. Perova<sup>i</sup>,  
Nikolay I. Pilipenko<sup>j</sup>, Egor A. Siselyatin<sup>k</sup>, Erzhenya B. Tulesonova<sup>l</sup>

<sup>a,f,l</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>b</sup>Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>c</sup>Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

<sup>d</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>e</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>g</sup>Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

<sup>h,i</sup>Sigma-Geo LLC, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The purpose of the study of igneous and metamorphic complexes of the Olkhon region is to develop a petrophysical legend for a new generation aerospace geological map as a basis for interpreting geophysical survey materials, geodynamic reconstructions, etc. Using modern methods and equipment, field work was carried out to select oriented samples, conduct laboratory petrophysical and analytical studies. Scalar and vector physical parameters (density, magnetic susceptibility, vectors of remanent and total magnetisation, Königsberger coefficient) characterising modern and ancient (paleomagnetic) state of the objects under investigation were obtained. Statistical processing of the primary measurements showed that the studied complexes are conditionally divided into two petromagnetic complexes: weakly and strongly magnetic. Since the basites (dolerites, gabbros and beerbachites) of the second petromagnetic complex may prove to be promising objects for geodynamic reconstructions, they were subjected to reconnaissance geochemical, magnetomineralogical and paleomagnetic surveys. Unaltered magnetite (Fe > 90 %) with a Curie point of about 580 °C is found to be the main mineral-carrier of natural remanent magnetization vectors in the studied formations. In the course of laboratory demagnetisations by alternating magnetic field and temperature, the considered geological formations retained the vectors of characteristic natural remanent magnetization, which can be used for paleogeodynamic reconstructions of the Olkhon terrane.

**Keywords:** Western Baikal region, Olkhon terrane, aerospace geological map, petrophysical legend, Early Paleozoic, magnetites, paleomagnetism

**Funding:** The work was carried out within the framework of the project activities of students of the Irkutsk National Research Technical University in the period from 2023 to 2024.

**For citation:** Konstantinov K.M., Sklyarov E.V., Kosareva L.R., Lavrenchuk A.V., Pushkarev E.V., Konstantinov G.K., et al. Petrophysical studies of igneous and metamorphic complexes of the Olkhon geodynamic polygon. *Earth sciences and subsurface use*. 2025;48(1):24-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-24-49>. EDN: ALWXDW.

### Введение

Ольхонский регион был выбран в качестве геодинамического полигона, в пределах которого предлагалось обсудить перспективы отличной от прежней интерпретации массива новых накопленных геологических данных, кардинально изменивших представления о геологии и тектонике Западного Прибайкалья (рис. 1)<sup>1</sup>. Ольхонский регион занимает клю-

чевую позицию в системе основных структур Азии – здесь проходит граница между Сибирским кратоном и Центрально-Азиатским складчатым поясом, выяснение истории взаимодействия которых во времени и пространстве представляется интересной и актуальной задачей.

В процессе работы стало очевидно, что без геологической карты, которая отражала

<sup>1</sup> Скляр Е.В., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Лавренчук А.В. [и др.]. Аэрокосмическая геологическая карта юго-западной части Ольхонского региона (Байкал). Зона Крестовский – Широкая. Ольхонский геодинамический полигон. М.: Группа компаний А1Т1S, 2012.



**Рис. 1. Схема расположения изученных обнажений Ольхонского региона Западного Прибайкалья**  
Красными звездочками на карте обозначены обнажения с указанием номера  
**Fig. 1. Schematic map of the studied outcrops in the Olkhon area of the Western Baikal region**  
The red stars on the map indicate the outcrops with specified numbers

бы реальный образ коллизии системы, вскрытой здесь в современном срезе, дальнейшее продвижение в исследованиях вряд ли возможно. С этой целью для Ольхонского региона была составлена аэрокосмическая геологическая карта (Байкал, Россия) масштаба 1:40000 [1]<sup>2</sup>. Стоит отметить, что непрерывно поступающий новый полевой геологический и аналитический материал заставляет вносить в нее серьезные коррективы, нередко касающиеся в том числе базовых представлений.

Несмотря на то что панхроматические и мультиспектральные космические снимки со спутников GeoEye-1, WORLD VIEW-2, QUICK BIRD-2, IKONOS-2 достаточно четко отражают детали геологического строения масштаба 1:1500–1:5000, помощь в решении данной проблемы оказывают и материалы геофизических съемок. В последнее время на отдельных участках Ольхонского региона ведутся опытно-методические геофизические исследования по районированию территории силами института «Сибирская школа геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета, Института земной коры СО РАН и ООО «Сигма-Гео».

Основным продуктом геофизического районирования является карта<sup>3</sup>. Под петрофизическим картированием мы понимаем сочета-

ние методов (скважинных, наземных, морских и дистанционных) геофизических съемок (телеинформация о площадном распределении физических масс) с площадными геологическими данными и исследованиями физических свойств горных пород района. Ключом к дешифрированию указанной карты служит петрофизическая легенда, атрибутами которой являются петрофизические таксоны<sup>4</sup>. Таким образом, составленная в ходе петрофизических исследований карта отражает пространственное распределение петрофизических таксонов различных геологических эпох, генетических типов, составов минералов (породообразующих и акцессорных), влияющих на особенности их современных физических свойств: объемной плотности –  $\sigma$ , магнитной восприимчивости –  $\chi$ , векторов естественной остаточной намагниченности –  $In$ , удельного электрического сопротивления –  $\rho$ , естественной радиоактивности и др.

Другая важная составляющая, помимо петрофизического картирования, связана с необходимостью изучения палеомагнетизма некоторых осадочных, магматических и метаморфических комплексов Ольхонского террейна в качестве его количественной характеристики для геодинамических реконструкций. Решение перечисленных проблем предусматривает отбор ориентированных образцов.

<sup>2</sup> Федоровский В.С., Скляр Е.В., Мазукабзов А.М., Котов А.Б., Каргополов С.А., Лавренчук А.В. [и др.]. Геологическая карта массива Тажеран (Байкал). Масштаб 1:100000. М.: Группа компаний А1Т1S, 2009.

<sup>3</sup> Петрофизика: справочник. В 3 кн. Кн. 2. Техника и методика исследований / под ред. А.А. Молчанова, Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1992. 256 с.

<sup>4</sup> Константинов К.М. Магнетизм кимберлитов и траппов зоны сочленения Вилюйской и Тунгусской синеклиз Сибирской платформы: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.10. Иркутск, 2014. 34 с.



В период с 1958 по 1968 г. под руководством М.Р. Новосёловой (1959 г.), Ю.П. Осинковского (1963 г.), В.Т. Кардаш (1964, 1965, 1968 гг.), А.М. Корнейчука (1965 г.), Ю.К. Журавлёва (1963 г.) и других исследователей было изучено около 10000 образцов разных геологических образований Ольхонского региона [2], для основной массы которых определены плотность и магнитная восприимчивость. Лишь для трехсот неориентированных (!) образцов был измерен модуль естественной остаточной намагниченности. В результате анализа полученного фактического материала были сделаны следующие выводы:

1. Точки отбора образцов размещаются неравномерно, а полученные петрофизические данные по ряду петрофизических таксонов статистически не представительны.

2. Отсутствие ориентированных образцов не позволяет изучать тензорные и векторные физические параметры (например, анизотропию магнитной восприимчивости, векторы естественной остаточной, индуктивной  $I_i$  и суммарной  $I_s$  намагниченностей), что делает невозможным их использование для физико-геологического моделирования, палеомагнитных реконструкций и т. п.

3. Статистическая обработка результатов петрофизических измерений выполнена некорректно, что может отрицательно повлиять на результаты интерпретации материалов геофизических съемок при решении обратных задач (построение физико-геологических моделей).

4. Изученные горные породы нуждаются в пересмотре и уточнении их состава, строения, возраста и прочей информации для формирования современной петрофизической легенды.

Таким образом, актуальность петрофизических исследований горных пород Ольхонского региона заключается в повышении достоверности аэрокосмической геологической карты как основы геодинамических реконструкций террейнов Центрально-Азиатского пояса с помощью комплекса геофизических методов. В связи с высокой востребованностью материалов по физическим свойствам горных пород целью проведенных работ являлась разработка петрофизической легенды нового поколения, опирающейся на современную геологическую основу и корректную

петрофизическую, палеомагнитную фактографию. На данном этапе перед исследователями стояли три основные задачи.

1. Отбор ориентированных образцов из важных для петрофизического картирования петрофизических таксонов.

2. Проведение первичных лабораторных измерений и лабораторных исследований (петро- и палеомагнитных, петрографических, аналитических и пр.).

3. Корректная статистическая обработка полученных результатов и составление варианта петрофизической легенды (таблица дескриптивных значений петрофизических параметров).

### Материалы и методы исследования

Первые геологические исследования Ольхонского региона проводились Д.Г. Мессершмидтом, И.Г. Георги, Г.Ф. Миллером, И.Г. Гmeliным, Г.В. Стеллером, П.С. Палласом начиная с первой половины XVIII в. Систематическое описание геологии региона дали И.Д. Черский (1886 г.) и В.А. Обручев (1890 г.), определившие принадлежность метаморфических толщ побережья Байкала к архею [3]. Поисковые и геолого-съёмочные работы на территории развернулись в XX в. под научным руководством Б.Н. Артемьева, Л.И. Салопа, В.Д. Маца, С.М. Замараева, А.П. Кочнева, Е.В. Павловского и др. [4 и др.]. С конца 1950-х гг. по 1960 г. на территории Западного Прибайкалья проводились аэромагнитная и гравиметрическая съемки масштаба 1:1000000 и крупнее [2, 5 и др.].

Новый этап изучения Ольхонского региона связан с именем Валентина Сергеевича Федоровского, который привлек к исследованиям геологов из Москвы, Ленинграда, Новосибирска, Иркутска. Синтез новых данных, полученных за тридцать с лишним лет, позволил создать аэрокосмическую геологическую карту масштаба 1:40000 (Байкал, Россия) [1], которая и является основой для формирования современной петрофизической легенды.

Приольхонье, для территории которого планировалась разработка петрофизической легенды, является уникальным геодинамическим полигоном<sup>5</sup>, где на современном эрози-

<sup>5</sup> Тектоника юга Восточной Сибири. (Объяснительная записка к тектонической карте юга Восточной Сибири масштаба 1:1500000) / сост.: А.П. Таскин, Г.Л. Митрофанов, Ф.В. Никольский, Т.В. Мордовская. Иркутск: Изд-во ВостСибНИИГГиМС, 1987. 104 с.

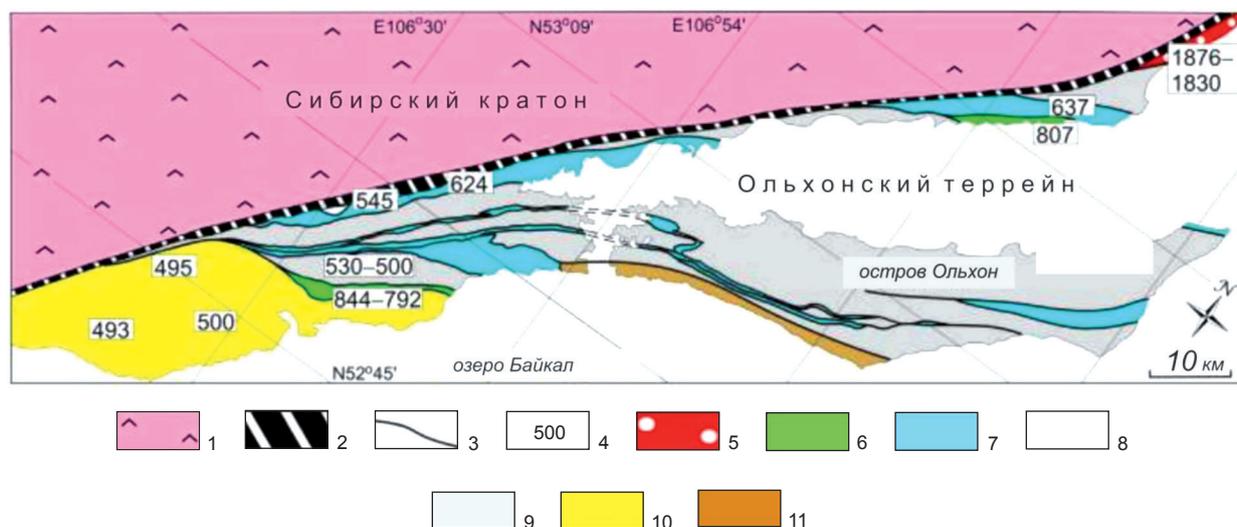


онном срезе наблюдаются выходы мантийных и нижнекоровых пород, структур фундамента Сибирского кратона и Центрально-Азиатского складчатого пояса. Граница Ольхонского террейна (раннепалеозойский коллизионный шов – Приморский разлом, представленный разнообразными бластомилонитами) с Сибирским кратоном выражена в виде эскарпа, протягивающегося на несколько сотен километров в северо-восточном направлении, наблюдаемого с большинства возвышенностей территории, и отчетливо видна на аэро- и космоснимках [1].

Ольхонский композитный террейн (рис. 2) является гетерогенной структурой и представляет собой коллаж отдельных блоков, отличающихся друг от друга по составу пород, степени метаморфической переработки, возрасту и геодинамическим условиям их образования [6–9]. В его строении участвуют более 200 тектонических единиц, в том числе 4 субтеррейна и 5 экзотических микротеррейнов. Интегральная структура может быть определена как

синметаморфический коллизионный коллаж, представленный сложным комплексом разнообразных магматических и метаморфических пород. Среди последних преобладают гнейсы и гранитогнейсы, широким распространением пользуются мраморы и амфиболиты. Магматические комплексы представлены многочисленными жилами, изредка – небольшими массивами гранитоидов, разноразмерными телами основных и ультраосновных пород. При первом приближении в террейне можно выделить две части: северную, преимущественно гнейсово-карбонатную, и южную, преимущественно вулканогенно-карбонатную.

С начала XXI в. по территории Ольхонского региона<sup>6</sup> получено множество геохронологических данных (см. рис. 2) [9–14 и др.], установлен кембрийский возраст дометаморфических субщелочных габброидов и их субвулканических комагматов (500 млн лет, уран-свинцовый изохронный метод, циркон) и два пика регионального метаморфизма – около 500 и 460–470 млн лет [15]. Указанные пики



**Рис. 2. Упрощенная геодинамика Ольхонского террейна (согласно источнику [9] с переводом авторов):**

1 – Сибирский кратон; 2 – палеозойский коллизионный шов; 3 – сдвиговые зоны;  
4 – возраст протолита (уран-свинцовый метод, циркон), млн лет; 5–11 – Ольхонский террейн:  
5 – палеопротерозойский срез, 6 – тонийская активная континентальная окраина, или коллизионная система, 7 – Эдиакарская островная дуга, 8 – Эдиакарский/Кембрийский океанический остров (гайот),  
9 – Кембрийский бассейн задней коры микроконтинента, 10 – Кембрийская зрелая островная дуга, или надсубдукционная аккреционная система, 11 – ордовикская аккреционно-коллизионная система

**Fig. 2. Simplified geodynamics of the Olkhon terrane (according to source [9] in authors' translation):**

1 – Siberian craton; 2 – paleozoic collisional suture; 3 – shear zones; 4 – protolith age (uranium-lead method, zircon), million years; 5–11 – Olkhon terrane: 5 – paleoproterozoic section, 6 – tonian active continental margin or collision system, 7 – Ediacaran island arc, 8 – Ediacaran/Cambrian oceanic island (guyot), 9 – Cambrian basin of the back crust of the microcontinent, 10 – Cambrian mature island arc, or suprasubduction accretion system, 11 – ordovician accretion-collision system

<sup>6</sup> Федоровский В.С. Геологическая карта Юго-западной части Ольхонского региона. М.: Изд-во ГИН РАН, 2004.



достаточно уверенно фиксируют два основных тектономагматических события в истории геологического развития Ольхонского региона, приведших к формированию структуры Ольхонского террейна. Первое отвечает причленению Ольхонского террейна к Сибирскому кратону и проявлению раннего покровного тектогенеза, который сопровождался метаморфическими событиями (500–485 млн лет). Второе масштабное тектоно-магматическое событие фиксирует процессы сдвигового тектогенеза, метаморфизма амфиболитовой фации и внедрения разнообразных по составу синтетонических интрузий основного и кислого составов (470–460 млн лет).

В раннем палеозое все геологические события в Западном Прибайкалье связаны с формированием Ольхонской коллизионной системы [9, 12–14, 16–22 и др.]. Ольхонский композитный террейн Центрально-Азиатского складчатого пояса является одним из террейнов раннепалеозойского Прибайкальского коллизионного пояса, который сформировался вдоль южной границы Сибирского кратона на начальных стадиях закрытия Палеоазиатского океана в его северной части за счет причленения различных по возрасту и геодинамической природе террейнов к окраине кратона (рис. 3, *b*). Согласно палеомагнитным данным<sup>7</sup>, в этот период времени Сибирский кратон располагался в экваториальном поясе северного полушария и смещался к Северному полюсу, а его современная южная граница являлась фронтальной, к которой на протяжении неопротерозоя – раннего палеозоя «причаливали» разнообразные тектоно-стратиграфические экзотические блоки в результате закрытия Палеоазиатского океана (рис. 3, *a*). Близкий к современному облик генеральных геологических структур Байкальской горной области сформировался в конце позднего палеозоя.

Поскольку в строении Ольхонского террейна участвует большое количество разнообразных горных пород, в первую очередь для петромагнитных исследований были выбраны широко представленные в регионе магматические комплексы базитового состава. Пристальное внимание было уделено габброидам, а также вулканическим и субвулканиче-

ским образованиям, представленным амфиболитами и беербахитами.

В пределах террейна (см. рис. 1 и 2) в настоящее время выделено четыре разновозрастных комплекса габброидов: Танхан, Тонта, бирхинский и усть-крестовский. К наиболее древним относятся офиолитовые габброиды комплекса Танхан [23]. Возраст офиолитов предположительно неопротерозойский. Были опробованы массивы Тогот (обнажения 23-6, 23-7)<sup>8</sup>, Танхан (обнажение 23-24), Оргойта (обнажение 23-25) и два небольших тела без названия (обнажения 23-13, 23-14).

Габброиды комплекса Тонта слагают несколько десятков мелких тел среди мраморов, гнейсов и кристаллических сланцев (обнажения 23-40 и 23-41), наиболее крупным является массив Улан-Харгана, который и был опробован (обнажения 24-47, 24-48 и 24-49). Предполагаемый возраст – кембрий.

Бирхинский габброидный комплекс представлен несколькими крупными массивами, из которых были опробованы собственно Бирхинский (обнажения 23-16, 23-17 и 23-27) и Крестовский (обнажения 23-21, 23-22) массивы. Возраст габброидов – 500 млн лет [24].

Субщелочные габброиды усть-крестовского комплекса были опробованы в пределах одноименного (обнажения 23-38, 23-39) и Тажеранского (обнажения 23-8 и 23-10) массивов. В последнем также были взяты пробы из нефелиновых и щелочных сиенитов (обнажения 24-51 и 24-53). Возраст габброидов составляет 460–470 млн лет [21, 24]. К этому же комплексу были отнесены своеобразные фас-сайтовые габбро (обнажения 23-19 и 23-21), слагающие серию мелких тел в обрамлении Усть-Крестовского массива [25]. Их возраст – 485 млн лет.

Кроме этого, были опробованы беербахиты (обнажения 23-11 и 23-23) и разнообразные амфиболиты (обнажение 23-14). Возраст беербахитов (продуктов автотектонического метаморфизма субвулканических тел) составляет 470 млн лет [22, 26]. Амфиболиты считались ранее метаморфизованными вулканитами в вулканогенно-осадочных сериях, однако более поздние исследования показали, что они могут являться линейаризированными в про-

<sup>7</sup> Константинов К.М. Динамическая физико-геологическая модель Байкальской складчатой области по палеомагнитным данным: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 04.00.12. Иркутск, 1998. 18 с.

<sup>8</sup> Число обнажения указывает: год отбора-порядковый номер.

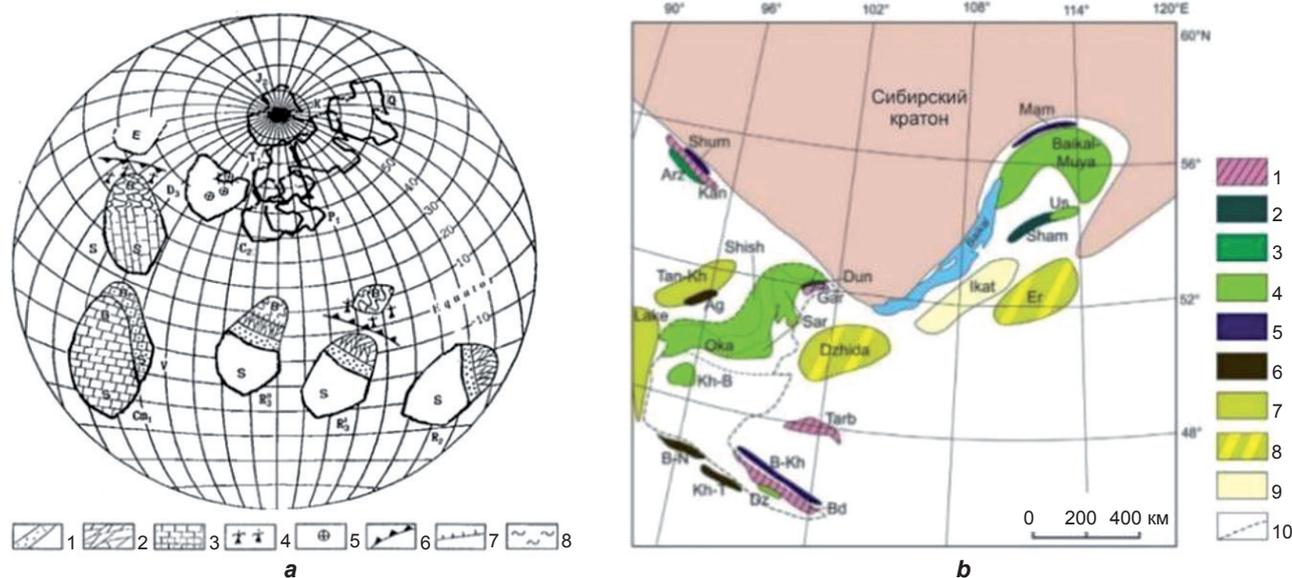


цессе сдвигового тектогенеза офиолитовыми габбро, а также метаморфизованными силлами и дайками.

Отобрана единственная дайка базитов (обнажение 24-60), прорывающая под косым углом сланцеватость бластомилонитов кол-

лизионного шва протяженностью около 2 км с мощностью 1–5 м [27].

Методика комплексных исследований петрофизических таксонов Ольхонского региона с целью формирования петрофизической легенды предусматривала:



**Рис. 3. Схемы геодинамического развития горно-складчатого обрамления юга Сибирского кратона в рифее – среднем палеозое (согласно источнику [9] с переводом авторов):**

*a* – палинспастическая реконструкция перемещения Сибирского кратона

в позднем докембрии–фанерозое: 1 – Прото-Байкало-Патомский линеймент; 2 – подводные конусы выноса;

3 – терригенно-карбонатные и карбонатные осадки венда – раннего палеозоя; 4 – островные дуги;

5 – внутриплитный магматизм; 6 – зоны субдукции;

7 – швы столкновения континентальных блоков; 8 – складчатые зоны

*S* – Сибирская платформа, микроконтиненты; *B* – Баргузинский; *E* – Еравнинский

*b* – докембрийские блоки земной коры и неопротерозойско-кембрийские супра-субдукционные сборки в северной части Центрально-Азиатского складчатого пояса: 1 – блоки докембрийской земной коры;

2 – стениан-тонинские (около 1050–900 млн лет назад) офиолиты; 3 – стениан-тонинские

(около 1050–900 млн лет назад) океанические комплексы островных дуг; 4 – тонинские

(около 850–750 млн лет назад) надсубдукционные комплексы; 5 – криогенно-эдиакарские

(около 680–600 млн лет назад) офиолиты и комплексы океанических островных дуг;

6 – эдиакарско-раннекембрийские (около 580–520 млн лет назад) офиолиты; 7 – эдиакарско-раннекембрийские

(около 580–520 млн лет назад) океанические комплексы островных дуг;

8 – эдиакарско-раннекембрийские (около 580–520 млн лет назад) – кембрийские

(около 520–490 млн лет назад) комплексы островных дуг;

9 – Эдиакарско-раннекембрийский (около 580–520 млн лет назад) задуговой бассейн;

10 – контуры Дзаванского и Тувино-Монгольского микроконтинентов

Блоки докембрийской земной коры:

*Bd* – Байдраг; *Tarb* – Тарбагатай; *Gar* – Гарган; *Kan* – Кан

Стениан-Тонинские (1050–900 млн лет назад) комплексы:

*Dun* – дунжугурский офиолит; *Sham* – шаманские офиолиты; *Arg* – Арзыбейская островная дуга

Тонийские (850–750 млн лет назад) комплексы: *Dz* – Дзаванская активная окраина, или континентальный

рифт; *Kh-B* – Холбонурская островная дуга; *Oka* – Окинская аккреционная призма;

*Shish* – шишихидские офиолиты; *Sar* – Сархойская активная окраина; *Us* – Усой, островная дуга;

*Vaikal-Muya* – Байкало-Муйская активная окраина

Криогенно-эдиакарские (680–600 млн лет назад) комплексы:

*B-Kh* – баянхонгорские офиолиты; *Mat* – мамаканские офиолиты; *Shum* – Шумихинская островная дуга

Эдиакарско-раннекембрийские (580–520 млн лет назад) комплексы:

*B-N* – баяннурские офиолиты; *Kh-T* – Хан-Тайширские офиолиты; *Ag* – агардаг-нес-хемские офиолиты;

*Lake* – Озерная островная дуга; *Tan-Kh* – Таннуоль-Хамсаринская островная дуга

Эдиакарско-раннедокембрийские (580–520 млн лет назад) – кембрийские (520–490 млн лет назад) комплексы:

*Dzhida* – Джидинская островная дуга; *Er* – Еравнинская островная дуга; *Ikat* – Икатский задуговой бассейн



**Fig. 3. Diagrams of geodynamic development of the folded mountain framework of the southern Siberian craton in the Riphean – Middle Paleozoic (according to the source [9] in authors' translation):**

- a – palinspastic reconstruction of Siberian craton movement in the Late Precambrian–Phanerozoic:*  
1 – Proto-Baikal-Patom lineament; 2 – abyssal fans; 3 – terrigenous-carbonate and carbonate sediments of the vendian – early paleozoic; 4 – island arcs; 5 – intraplate magmatism; 6 – subduction zones; 7 – continental block collision sutures; 8 – folded zones  
S – Siberian platform, microcontinents; B – Barguzinsky; E – Eravinsky  
*b – precambrian crustal blocks and neoproterozoic-cambrian supra-subduction assemblages in the northern part of the Central Asian Folded Belt:* 1 – precambrian crustal blocks; 2 – stenian-tonian (ca. 1050–900 million years ago) ophiolites; 3 – stenian-tonian (ca. 1050–900 million years ago) oceanic complexes of island arcs; 4 – tonian (ca. 850–750 million years ago) suprasubduction complexes; 5 – cryogenian-Ediacaran (ca. 680–600 million years ago) ophiolites and oceanic island arc complexes; 6 – ediacaran-early cambrian (ca. 580–520 million years ago) ophiolites; 7 – ediacaran-early cambrian (ca. 580–520 million years ago) oceanic island arc complexes; 8 – ediacaran-early cambrian (about 580–520 million years ago) – cambrian (about 520–490 million years ago) island arc complexes; 9 – Ediacaran-Early Cambrian (about 580–520 million years ago) back-arc basin; 10 – contours of the Dzavan and Tuva-Mongolian microcontinents  
Blocks of the Precambrian crust:  
Bd – Baidrag; Tarb – Tarbagatai; Gar – Gargan; Kan – Kan  
Stenian-Tonian (1050–900 million years ago) complexes:  
Dun – dunzhugur ophiolite; Sham – shaman ophiolites; Arz – Arzybey island arc  
Tonian (850–750 million years ago) complexes:  
Dz – Dzavan active margin, or continental rift; Kh-B – Kholbonur island arc; Oka – Oka accretionary prism; Shish – shishkhid ophiolites; Sar – Sarkhoy active margin; Us – Usoi, island arc; Baik-Muya – Baik-Muya active margin  
Cryogenian-Ediacaran (680–600 million years ago) complexes:  
Kh – bayankhongor ophiolites; Mam – mamakan ophiolites; Shum – Shumikhinskaya island arc  
Ediacaran-Early Cambrian (580–520 million years ago) complexes:  
B-N – bayannur ophiolites; Kh-T – Khan-Tayshir ophiolites; Ag – agardag-nes-khem ophiolites; Lake – Lake island arc; Tan-Kh – Tannuol-Khamsara island arc  
Ediacaran-early precambrian (580–520 million years ago) – cambrian (520–490 million years ago) complexes:  
Dzhida – Dzhida island arc; Er – Eravinskaya island arc; Ikat – Ikat back-arc basin

– отбор ориентированных образцов (штуфов) из естественных обнажений и строительных карьеров (см. рис. 1);

– пробоподготовку (изготовление кубиков с ребром 20 мм, шлифов, порошков и пр.);

– первичные измерения объемной плотности, магнитной восприимчивости и векторов естественной остаточной намагниченности;

– магнито-минералогические анализы по изучению петрографического и минералогического состава, гистерезисных параметров и точек Кюри  $\Theta$  минералов ферритмагнитной фракции;

– рекогносцировочное изучение компонентного состава векторов естественной остаточной намагниченности и выделение характеристической компоненты  $In^{ch}$  [28].

Отбор ориентированных образцов проведен по общепринятой методике<sup>9</sup> из около 60 обнажений (см. рис. 1) в современной системе координат. В среднем из одного обнажения отби-

ралось 5 штуфов, что составило более 300 шт. Из каждого штуфа выпиливалось по три кубика с ребром 20 мм, что в общей сложности составило около 1000 кубиков. Комплекс проведенных исследований петрофизических таксонов Ольхонского региона включал:

1. Петрофизические исследования, характеризующие гравитационное и магнитное состояния горных пород в месте их нахождения<sup>10</sup>. На данном этапе проходило изучение объемной плотности  $\sigma$ , магнитной восприимчивости  $\alpha$ , векторов остаточной  $In$ , индуктивной  $li = \alpha H$  (где  $H$  – вектор напряженности магнитного поля Земли в районе работ) и суммарной  $Is = li + In$  намагниченностей, от которых зависит тип наблюдаемого (аномального и локального) магнитного поля. В свою очередь, векторы намагниченности ( $In$ ,  $li$  или  $Is$ ) определяются в пространстве тремя составляющими: величиной (соответственно  $In$ ,  $li$  и  $Is$ ), склонением ( $0 < D < 360^\circ$ ) и наклонением ( $-90^\circ < J < 90^\circ$ ). Отношение  $In/li$

<sup>9</sup> Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С. [и др.]. Палеомагнитология / под ред. А.Н. Храмова. Л.: Недра, 1982. 312 с.

<sup>10</sup> Логачев А.А., Захаров В.П. Магниторазведка. Л.: Недра, 1979. 351 с.



характеризует коэффициент Кёнигсбергера (фактор  $Q$ ).

2. Аналитические (геохимические, петрографические) исследования, которые проводились в Институте земной коры СО РАН и в Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск). Благодаря использованию сканирующего электронного микроскопа (СЭМ-ЭДС)<sup>11</sup> были получены изображения исследуемой поверхности в обратно рассеянных электронах и химический состав минералов в точке. Условия работы: режим высокого вакуума при ускоряющем напряжении 20 кВ, расстояние – 15 мм.

3. Дополнительно к аналитическим исследованиям химического состава минералов ферромагнитной фракции, а также с целью установления природы векторов естественной остаточной намагниченности были проведены и магнито-минералогические исследования – магнито-структурный и термомагнитный анализы в Институте геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

Магнито-структурный анализ был проведен с целью определения таких гистерезисных параметров ферромагнитных минералов габбро и беербахитов, как значения удельного магнитного момента насыщения  $J_s$ , коэрцитивной силы  $B_c$  по кривой индуктивной намагниченности и значения удельного магнитного момента остаточного насыщения  $J_{rs}$ , а также разрушающего ее поля  $B_{cr}$  [29, 30], диа-/парамагнитная, ферромагнитная и суперпарамагнитная компоненты магнитной восприимчивости  $\chi_p$ ,  $\chi_f$ ,  $\chi_{sp}$  [31].

Термомагнитный анализ позволяет определять компонентный химический состав ферромагнетиков по точкам Кюри на графиках зависимости  $li = f(T)$  [32]. Проведение термомагнитных исследований осуществлялось при помощи экспрессных весов Кюри, которые позволяют измерять зависимость индуктивной намагниченности в поле до 0,2 Тл от температуры (до 800 °С) при скорости нагрева 100 °С/мин.

4. Проведены палеомагнитные исследования по изучению компонентного состава векторов естественной остаточной намагниченности горных пород [28]. Опыты были выполнены в институте «Сибирская школа

геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета и Институте земной коры СО РАН. Образцы подвергались лабораторным экспериментам по размагничиванию переменным магнитным полем и температурой.

При проведении петро- и палеомагнитных исследований учитывались отечественные и зарубежные методические разработки по графической и аналитической реализации решений петро- и палеомагнитных задач с использованием компьютерных программ Statistica-6 [33], Enkin-96 [34], PetroStat [35] и др.

Вышеперечисленные исследования были проведены с помощью такого современного оборудования, как:

– СЭМ TESCAN MIRA 3 LMU, оснащенный энергодисперсионными спектрометрами с системой микроанализа AztecLive Advanced Ultim Max 40 с безазотным детектором (Oxford Instruments Analytical Limited, Англия);

– измерители магнитной восприимчивости  $\chi$  (KLY-3s и MFK1-FA, Advanced Geoscience Instruments Company, Чехия);

– спин-магнитометры для измерения векторов естественной остаточной намагниченности (JR-6, Advanced Geoscience Instruments Company, Чехия);

– размагничивающие установки переменным магнитным полем (AF-Demagnetizer, Molspin Limited, Великобритания);

– вибро-магнитометры и измерители магнитной фракции (Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия) и др.

### Результаты исследований и их обсуждение

Распределение физических параметров изученных петрофизических таксонов (табл. 1, рис. 4) достаточно неравномерное, что объясняется разнообразным минералогическим составом. Закону нормального распределения в некоторой степени подчиняется объемная плотность, которая варьируется в пределах от 2500 до 3600 кг/м<sup>3</sup>. Примерно 75 % изученных образцов характеризуется средней плотностью от 2800 до 3100 кг/м<sup>3</sup>. Относительно повышенная плотность (до 3600 кг/м<sup>3</sup>) установлена в габброидах и долеритах (в том числе постколлизийных).

<sup>11</sup> Рид С.Дж.Б. Электронно-зондовый микроанализ и растровая электронная микроскопия в геологии. М.: Техносфера, 2008. 232 с



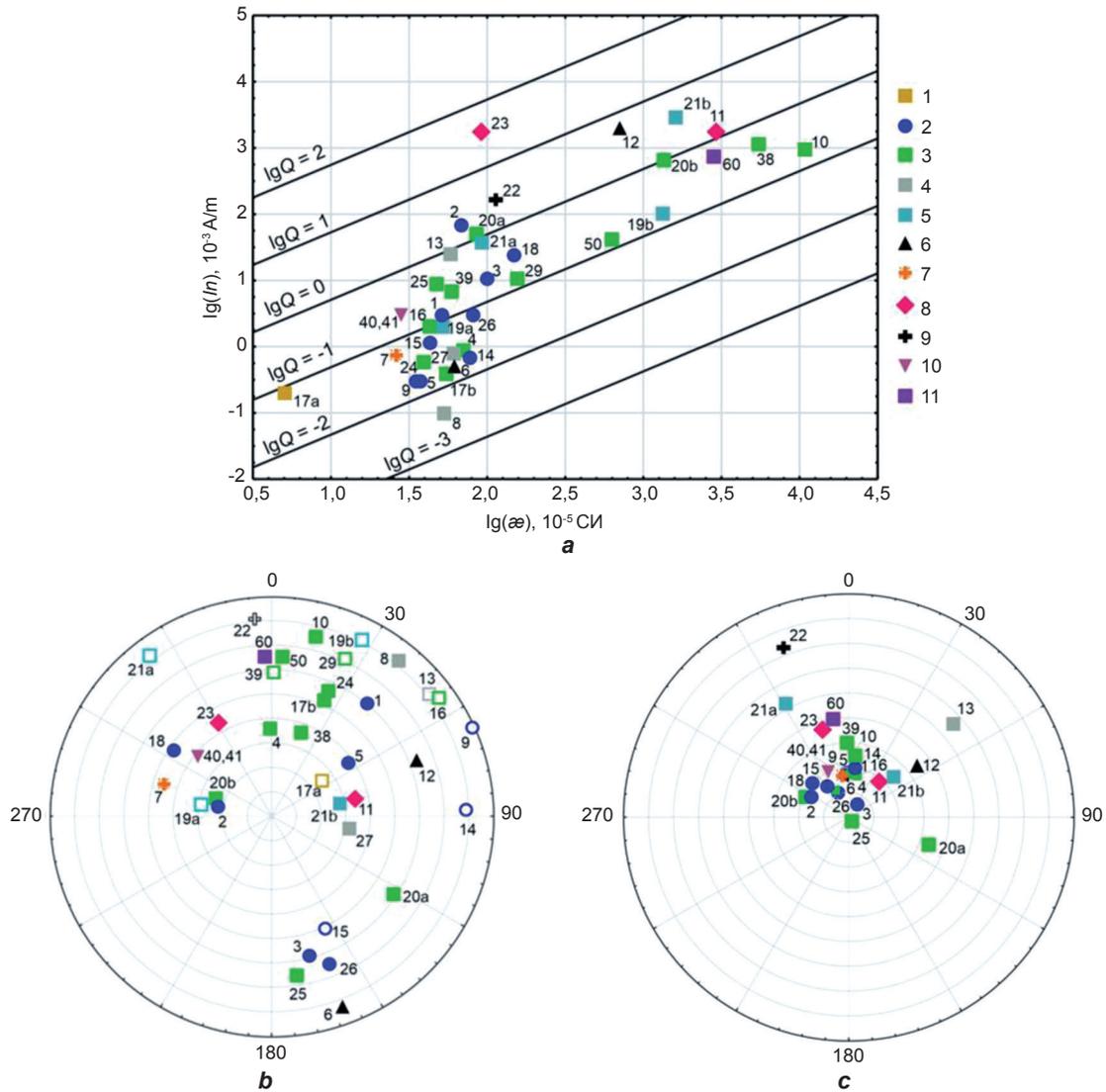
Таблица 1. Deskriptivnye znacheniya fizicheskikh parametrov petrofizicheskikh taksonov Olykhonskogo regiona  
Table 1. Descriptive values of Olkhon region petrophysical taxa physical parameters

Номер обна- жения	Типы пород	N	$\sigma$ , кг/м <sup>3</sup>		n	$\varepsilon$ , 10 <sup>-5</sup> СИ		$li$ , 10 <sup>-3</sup> А/м		$ln$ , 10 <sup>-3</sup> А/м		$Q$ , ед.		$Is$ , 10 <sup>-3</sup> А/м									
			$\sigma$	s		$\varepsilon$	e	li	e	ln	e	D	J	k	$\alpha_{95}$	Q	e	Is	e	D	J	k	$\alpha_{95}$
23-1	Амфиболиты	5	2859,0	35,3	16	51	1,01	25	1,01	3	1,19	40	30	3,5	23,2	0,12	1,19	27	1,02	7	70	117,4	3,4
23-2	Амфиболиты	5	2804,2	49,7	11	68	1,16	33	1,16	70	1,79	280	68	2,8	33,5	2,13	1,6	120	1,45	298	73	10,9	14,5
23-3	Амфиболиты	5	2814,6	31,5	14	99	1,27	48	1,27	11	1,54	165	31	1,6	49,2	0,23	1,58	66	1,25	32	84	5,4	19
23-4	Метагаббро	5	2943,8	55,0	16	70	1,03	34	1,03	0,9	1,33	0	54	3,94	21,4	0,03	1,3	35	1,04	355	73	9504	0,4
23-5	Амфиболиты	5	2882,7	28,0	14	37	1,03	18	1,03	0,3	1,27	55	52	2,2	35,9	0,02	1,27	18	1,03	357	73	2963	0,7
23-6	Долериты	5	3067,2	6,1	15	62	1,01	30	1,01	0,5	1,2	160	7	2,14	35,4	0,02	1,21	30	1,01	356	74	5818	0,5
23-7	Троктолиты	5	2917,4	45,1	16	25	1,04	12	1,04	0,9	1,18	287	44	1,5	52,2	0,07	1,16	13	1,04	351	73	357,9	2,0
23-8	Метагаббро	5	2930,2	23,8	15	53	1,01	25	1,01	0,1	1,16	39	8	1,2	76,3	0,01	1,16	26	1,01	355	73	60164	0,2
23-9	Амфиболиты	5	2886,9	94,5	12	35	1,03	17	1,03	0,3	1,36	66	-1	1,3	73,1	0,01	1,38	17	1,03	351	73	698,4	1,6
23-10	Габбро, массив Тажеран	5	2984,0	54,8	16	10700	1,04	5190	1,04	960	1,16	13,6	14,4	8,6	13,4	0,18	1,18	5838	1,03	3,5	65	203	2,6
23-11	Беербахит, массив Тажеран	5	3157,12	27,2	16	2914	1,16	1413	1,16	1729	1,7	78	55	1,7	44,6	1,22	1,55	3743	1,38	40	71	3,16	25,0
23-12	Трахидолериты, дайка, массив Тажеран	5	3144,0	78,0	17	702	1,19	341	1,19	2028	1,58	69	27	1,4	55,0	5,95	1,45	2357	1,52	53	56	1,76	40,2
23-13	Метагаббро	5	3104,2	109,7	14	58	1,1	28	1,1	25	1,8	52	-9	4,5	21,0	0,89	1,69	63	1,32	48	34	3,7	24,1
23-14	Гранатовые амфиболиты	5	3006,1	103,6	16	77	1,02	37	1,02	0,7	1,29	88	-11	2,68	28,2	0,02	1,3	37	1,02	0	72	975,6	1,12
23-15	Амфиболиты	5	2973,2	31,1	14	43	1,02	21	1,02	1,15	1,62	155	-39	1,7	46,5	0,05	1,64	22	1,1	326	75	7	16,2
23-16	Габбро, Уланурская полоса	5	2845,3	198,4	15	52	1,03	25	1,03	2	1,56	54	-7	2,12	35,7	0,06	1,54	26	1,04	11	73	96,1	3,9
23-17a	Мрамор, карьер Нарин Кунта	2	2663,2	*	7	5	1,13	3	1,13	0,2	1,27	55	-65	1,8	64,6	0,07	1,22	3	1,14	356	73	602,7	2,5
23-17b	Габбро, карьер Нарин Кунта	4	2893,3	134,1	13	54	1,03	26	1,03	0,4	1,18	24	38	1,9	43,9	0,01	1,18	26	1,03	355	73	19478	0,3
23-18	Амфиболиты	6	2875,5	63,3	14	147	1,24	71	1,24	24	1,84	304	42	1,5	54,2	0,34	1,65	118	1,43	313	70	4,7	20,6



23-19a	Фассаитовые габбро	2	3110,3	*	8	43	1,01	21	1,01	2	1,59	279	-61	1,7	63,7	0,11	1,58	18	1,05	335	78	54,8	7,5
23-19b	Фассаитовые габбро	1	2812,3	*	3	1326	1,28	643	1,28	105	1,16	27	-9	46,1	18,4	0,16	1,1	660	1,29	6	65	1207	3,5
23-20a	Моноцитаббро	2	2991,4	*	6	85	1,22	42	1,22	52	1,18	123	31	8,1	25,1	1,24	1,35	81	1,14	109	56	7,9	25,4
23-20b	Моноцитаббро	3	2905,4	*	14	1346	1,08	653	1,08	656	1,39	288	66	4,3	21,7	1,00	1,3	1362	1,18	297	72	21,4	8,8
23-20	Моноцитаббро	5	2923,31	71,3	20	589	1,35	286	1,35	304	1,42	196	85	2,67	25,07	1,07	1,22	584	1,38	317	86	6,8	13,5
23-21a	Фассаитовые габбро, массив Крестовский	1	3333,5	*	3	92	1,04	45	1,04	38	1,09	323	-8	105	12,1	0,84	1,14	62	1,11	331	38	168,8	9,5
23-21b	Фассаитовые габбро, массив Крестовский	4	3177,5	26,4	11	1608	1,11	780	1,11	2916	1,19	79	62	2	44,8	3,74	1,29	3632	1,13	48	66	2,4	38,1
23-22	Анортозиты, массив Крестовский	5	2719,6	32,7	16	112	1,18	54	1,18	170	1,28	355	-9	4,4	19,8	3,14	1,35	197	1,24	339	17	5	18,4
23-23	Беербахиты, Падь Широкая	5	3196,7	31,8	10	91	1,05	44	1,05	1780	1,45	331	46	1,03	*	40,3	1,46	1806	1,44	344	53	1,06	*
23-24	Габбро, Танхан	6	3026,3	43,1	17	39	1,02	19	1,02	0,6	1,55	24	34	1,8	40	0,03	1,55	21	1,07	3	72	89,7	3,8
23-25	Габбро, Оргойта	5	3005,7	44,3	18	47	1,05	23	1,05	9	1,34	171	24	2,2	31,3	0,4	1,36	29	1,09	147	88	8,4	12,7
23-26	Амфиболиты	5	3000,9	80,6	12	81	1,03	39	1,03	3	1,51	159	25	1,1	116,4	0,08	1,49	39	1,05	336	79	32,3	7,8
23-27	Метагаббро	5	2894,0	21,2	16	61	1,01	30	1,01	0,8	1,39	99	58	2,8	28,3	0,03	1,4	31	1,01	0	73	586,6	1,5
23-29	Амфиболиты, р. Анга	10	2794,7	129,5	25	154	1,22	74	1,22	11	1,49	25	-19	1,32	50	0,15	1,33	78	1,24	354	73	13,9	8,1
23-38	Габбро	6	2835,7	43,1	16	5420	1,04	2629	1,04	1145	1,14	19	54	2,04	35,76	0,44	1,13	3440	1,06	357	73	14,2	10,1
23-39	Габбро	4	2881,9	134,5	14	59	1,18	29	1,18	7	1,2	1	-31	4,88	20,09	0,26	1,15	28	1,19	359	60	65,9	4,9
23-40, 41	Эклогиты, р. Тонга	11	2982,2	118,1	27	28	1,36	14	1,36	3	1,39	309	51	1,97	28,03	0,25	1,3	18	1,34	336	70	22,84	5,9
24-50	Рудное габбро, массив Тажеран	13	2986,0	237,1	14	635	1,99	308	1,99	40	2,48	10	25	2,47	32,47	0,13	1,31	338	2,03	1	69	93,15	4,2
24-60	Долериты, п. Еланцы	7	3042,2	8,2	16	2834	1,1	1375	1,1	792	1,11	356	25	2,71	28,02	0,58	1,09	1472	1,13	344	50	21,83	8,1

Примечание.  $N$  – количество штучков;  $n$  – количество кубиков;  $s$  – ошибка среднего;  $e$  – стандартный множитель;  $k$  – кучность;  $\alpha_{65}$  – радиус овала доверия с вероятностью 95 %; \* – статистическая выборка (не представительная).



**Рис. 4. Спектр магнитных параметров петрофизических таксонов Ольхонского геодинамического полигона:**

*a* – диаграмма рассеивания магнитной восприимчивости  $\chi$ , естественной остаточной намагниченности  $I_n$  и фактора  $Q$   
Петрофизические таксоны:

1 – мраморы; 2 – амфиболиты; 3 – габбро; 4 – метагаббро; 5 – фассаитовые габбро; 6 – долериты/трахидолериты; обнажение 23-6 / обнажение 23-12; 7 – троктолиты; 8 – беербихиты; 9 – анортозиты; 10 – эклогиты; 11 – постколлизийные долериты, обнажение 24-60

*b, c* – стереограммы векторов естественной остаточной  $I_n$  (*b*) и суммарной  $I_s$  (*c*) намагниченности  
Залитые/полые фигурки – проекции векторов на положительную/отрицательную полусферу

**Fig. 4. Spectrum of magnetic parameters of Olkhon geodynamic polygon petrophysical taxa**

*a* – scatter diagram of magnetic susceptibility  $\chi$ , natural remanent magnetization  $I_n$  and factor  $Q$

Petrophysical taxa:

1 – marbles; 2 – amphibolites; 3 – gabbro; 4 – metagabbro; 5 – fassaite gabbro; 6 – dolerites/trachydolerites, outcrop 23-6 / outcrop 23-12; 7 – troctolites; 8 – beerbachites; 9 – anorthosites; 10 – eclogites; 11 – post-collisional dolerites, outcrop 24-60;

*b, c* – stereograms of vectors of natural remanent  $I_n$  (*b*) and total  $I_s$  (*c*) magnetization  
Filled/hollow figures – projections of vectors on positive/negative hemisphere

Наиболее сложная картина наблюдается в распределении значений магнитных параметров (см. табл. 1, рис. 4), которые, как правило, подчиняются логнормальному закону и имеют как минимум две моды. Наиболее контрастно

это наблюдается на гистограмме магнитной восприимчивости  $\chi$ , на которой более 70 % образцов имеют значений менее  $100 \cdot 10^{-5}$  СИ, а для 15 % образцов со значениями больше  $1000 \cdot 10^{-5}$  СИ относятся ко второй моде. Повы-



шенными значениями магнитной восприимчивости  $\chi$  характеризуются габбро в обнажениях 23-38 и 23-10 – больше  $5000$  и  $10000 \cdot 10^{-5}$  СИ соответственно. Распределения значений индуктивной намагниченности  $I_i$ , согласно вышеприведенной формуле, пропорциональны магнитной восприимчивости.

В отличие от магнитной восприимчивости, полимодальное распределение значений естественной остаточной намагниченности выражено не так четко (см. табл. 1, рис. 4), но у около 60 % образцов ее величина не превышает  $10 \cdot 10^{-3}$  А/м. У 11 % образцов габбро величина естественной остаточной намагниченности составляет от 1000 до  $10000 \cdot 10^{-3}$  А/м, у 2 % может достигать показателя от 30000 до  $80000 \cdot 10^{-3}$  А/м (у беербахитов в обнажениях 23-11 и 23-23). В обнажении 23-23 фактор  $Q > 40$  (!). Весьма вероятно, что в этих обнажениях естественная остаточная намагниченность могла образоваться в результате наложенных процессов (геологических и физических, например, грозовых разрядов). В ряде обнажений векторы естественной остаточной намагниченности имеют отрицательные наклоны  $J$  до  $-60^\circ$  (см. табл. 1, рис. 4, *b*), но из-за того, что у большинства изученных образцов фактор  $Q < 1$ , вектор суммарной намагниченности положительный (см. табл. 1, рис. 4, *c*).

На графике  $\chi$ - $\ln$ - $Q$  наблюдаются две обособленные группировки, которые условно разделены на слабо- и сильномагнитные (см. рис. 4, *a*). Особый интерес вызывает тот факт, что на ряде обнажений (23-11, 23-19, 23-20, 23-21 и 23-23) образцы могут принадлежать как к первой, так и ко второй группе. Образцы с относительно повышенными значениями намагниченности представляют первоочередной интерес для дальнейших аналитических, петро- и палеомагнитных исследований.

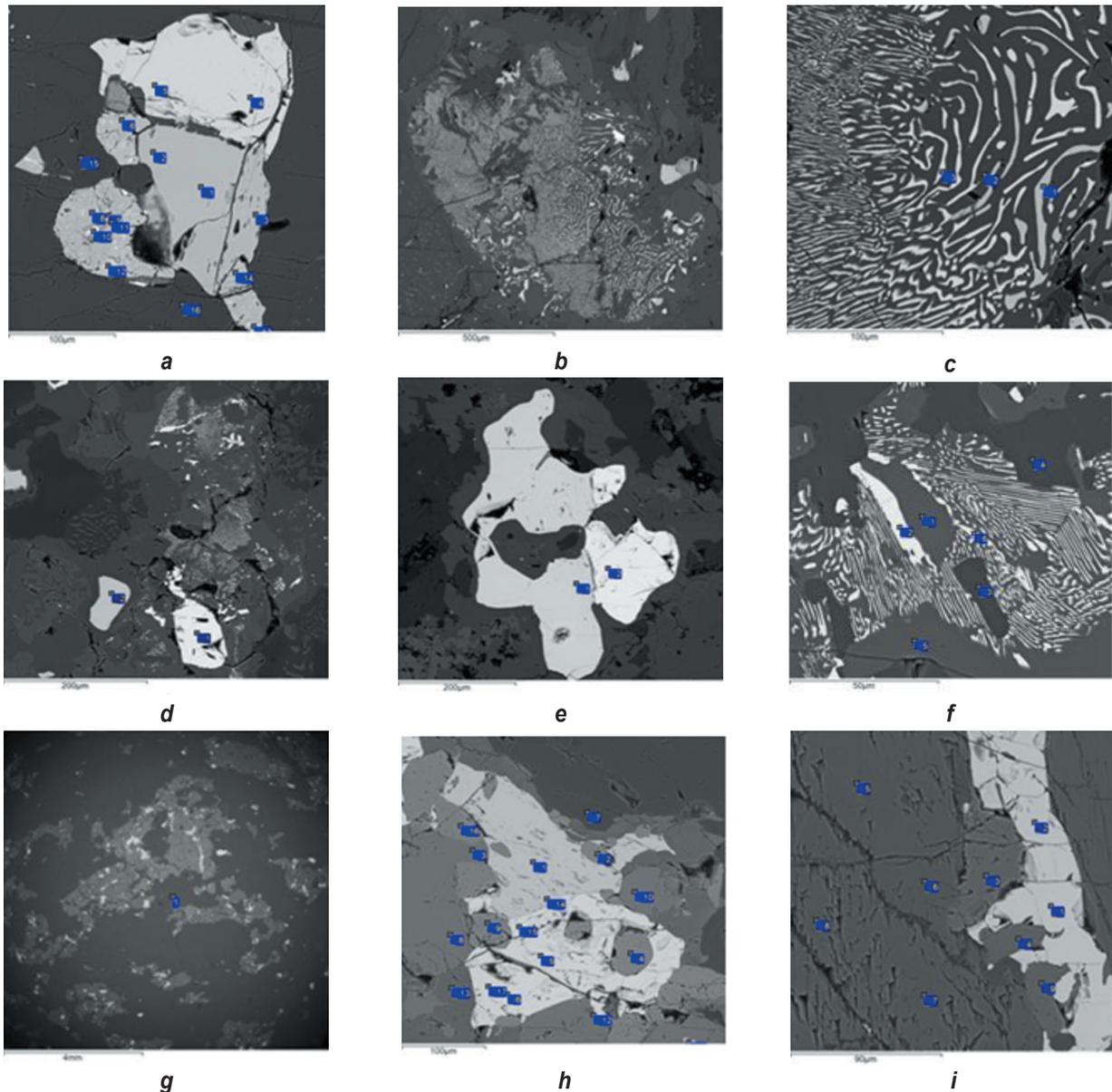
Результаты аналитических исследований рудных минералов в габброидах и беербахитах Ольхонского террейна показаны на рис. 5. и приведены в табл. 2. Рудные минералы в габбро Тажеранского массива (рис. 5, *a-c*) представлены магнетитом (более яркий) и ильменитом, их содержание достигает 2–4 % (рис. 6, *a*). Силикатные минералы – ортопироксен, плагиоклаз, амфибол. Апатит – акцессорный минерал. Магнетит почти не содержит примеси титана и по характеру проявлений разбивается на две группы. Первая образует отдельные зерна или срастания с ильменитом, реже с гетитом (см. рис. 5, *b*), вторая представ-

лена симплектитам (вместе с ильменитом) в ортопироксене (см. рис. 5, *c*). Отдельные зерна магнетита и ильменита кристаллизовались непосредственно из расплава, а симплектиты – при остывании породы.

Рудные минералы в беербахитах Тажеранского массива (рис. 5, *d-f*) представлены магнетитом (более яркий) и ильменитом, их содержание достигает 2–3 % (рис. 5, *d*). Силикатные минералы – ортопироксен, клинопироксен, плагиоклаз, амфибол. Апатит – акцессорный минерал. Магнетит почти не содержит примеси титана и по характеру проявлений разбивается на три группы. Первая группа образует отдельные зерна (рис. 5, *e*) или срастания с ильменитом, реже с гетитом (рис. 5, *f*). Размеры выделений магнетита могут достигать 100 мкм. Вторая группа проявления магнетита представлена симплектитам (вместе с ильменитом) в ортопироксене (рис. 5, *f*). Отдельные зерна магнетита и ильменита кристаллизовались непосредственно из расплава, а симплектиты – при остывании породы. Третья группа магнетита представлена мелкими (1–3 мкм) включениями в амфибол-пироксеновом симплектите.

Измененный норит Бугульдейского массива (строительный карьер, расположенный по трассе Бугульдейка – Петрово, обнажение 23-38) имеет типичную габбровую структуру (рис. 5, *g-i*). Рудные минералы представлены магнетитом (более яркий) и ильменитом, их содержание достигает 3–4 % (рис. 5, *g*). Силикатные минералы – ортопироксен, плагиоклаз, в небольших количествах встречаются амфибол и биотит. Апатит – акцессорный минерал. Магнетит почти не содержит примеси титана. Размерность выделений магнетита варьирует от 200–300 до 10–20 мкм (рис. 5, *h, g*). Крупные зерна нередко образуют срастания с ильменитом (см. рис. 5, *h*). Реже магнетит встречается в виде прожилков (в ассоциации с апатитом) в ортопироксене (рис. 6, *i*).

Результаты работы по изучению химического состава рудных минералов в габброидах и беербахитах Ольхонского террейна, проведенной с помощью сканирующего электронного микроскопа, представлены в табл. 2. Согласно источнику [36], изученные минералы ферромагнитной фракции относятся к промежуточной области титаномангнетитовой и гемоильменитовой серий, что может соответствовать точке Кюри магнетита  $\Theta \approx 580^\circ \text{C}$ .



**Рис. 5. Изображения в обратно рассеянных электронах:**

*a-c – образец 47 (габбро, Тажеранский массив, обнажение 23-10):*

*a – сросток магнетита (4, 5) с ильменитом (1, 2, 3) и гетитом (6, 8), b – симплектиты магнетита и ильменита в ортопироксене (общий вид), c – симплектиты магнетита (3) и ильменита (1) в ортопироксене (2);*

*d-f – образец 55 (беербахиты, Тажеранский массив, обнажение 23-11):*

*d – отдельные относительно крупные зерна магнетита (1) и ильменита (2) среди симплектитов и зерен пироксена и плагиоклаза, e – сросток магнетита (2) с ильменитом (1),*

*f – симплектиты магнетита и ильменита в ортопироксене (общий вид):*

*1 – ильменит, 2, 6 – магнетит, 3, 4 – амфибол, 5 – пироксен;*

*g-i – образец 175 (норит, Бугульдейский массив, обнажение 23-38):*

*g – общий вид, h – сросток магнетита с ильменитом: 1 – ильменит, 2, 4, 9, 16 – апатит, 3, 8,*

*10 – ортопироксен, 5, 6, 11, 15, 17 – магнетит, 7 – плагиоклаз, 12 – биотит, 13 – амфибол;*

*i – «прожилок» магнетита с апатитом в ортопироксене: 1, 2 – магнетит; 3, 4, 9 – апатит; 5-8 – ортопироксен*

**Fig. 5. Backscattered electron images:**

*a-c – sample 47 (gabbro, Tazheran massif, outcrop 23-10):*

*a – intergrowth of magnetite (4, 5) and ilmenite (1, 2, 3) and goethite (6, 8), b – symplectites of magnetite and ilmenite in orthopyroxene (general view), c – symplectites of magnetite (3) and ilmenite (1) in orthopyroxene (2);*

*d-f – sample 55 (beerbachites, Tazheran Massif, outcrop 23-11):*

*d – relatively large individual grains of magnetite (1) and ilmenite (2) among symplectites and grains*

*of pyroxene and plagioclase, e – intergrowth of magnetite (2) and ilmenite (1),*

*f – symplectites of magnetite and ilmenite in orthopyroxene (general view):*

*1 – ilmenite, 2, 6 – magnetite, 3, 4 – amphibole, 5 – pyroxene; g-i – sample 175 (norite, Buguldeisky massif, outcrop 23-38):*

*g – general view, h – intergrowth of magnetite and ilmenite: 1 – ilmenite, 2, 4, 9, 16 – apatite, 3, 8, 10 – orthopyroxene,*

*5, 6, 11, 15, 17 – magnetite, 7 – plagioclase, 12 – biotite, 13 – amphibole;*

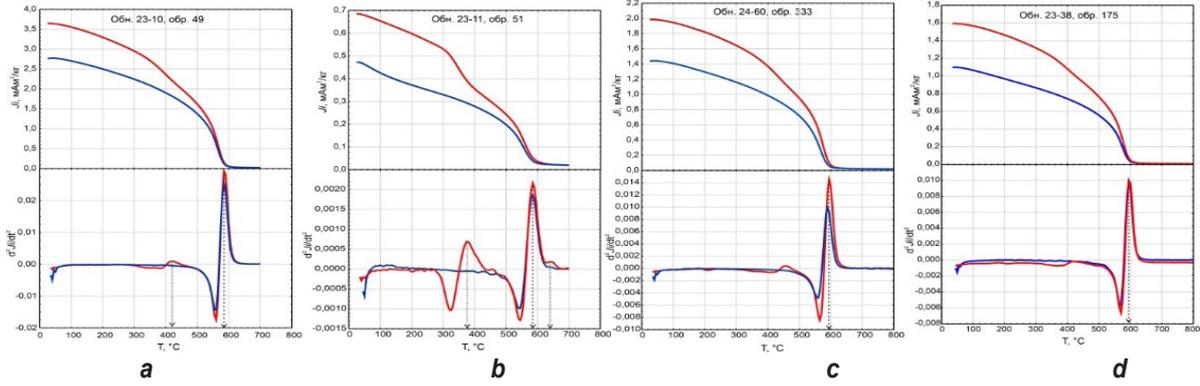
*i – “veinlet” of magnetite and apatite in orthopyroxene: 1, 2 – magnetite; 3, 4, 9 – apatite; 5-8 – orthopyroxene*



Таблица 2. Химический состав рудных минералов в габброидах и беербихитах  
Ольхонского террейна

Table 2. Chemical composition of ore minerals in gabbroids and beerbachites of the Olkhon terrane

Обнажение	Образец	Химический состав									Итого	
		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO		
38	175	0,13	0	0,45	0,18	0,69	66,99	31,18	0	0	98,93	
		0	0	0,47	0,19	0,72	67,90	31,31	0	0	99,87	
		0,21	0,35	0,36	0,16	0,72	66,24	31,61	0	0	98,93	
		0,17	0,32	0,51	0,22	0,66	66,33	31,60	0	0	99,15	
		0,17	0	0,4	0,16	0,68	67,92	31,65	0	0	100,29	
		0	0	0,43	0	0,71	67,39	30,96	0	0	98,78	
			0	0	0,47	0	0,71	67,77	31,16	0	0	99,40
		178	0,21	0	0,23	0,2	0,6	67,04	31,21	0	0	98,88
			0,17	1,03	0,23	0	0,54	65,58	32,19	0	0	99,20
			0,13	1,43	0,21	0,16	0,56	64,99	32,62	0	0	99,54
			0,13	21,37	0	0	0,84	26,68	50,38	0,77	0	99,33
			0	33,01	0	0	0,74	4,24	60,26	1,36	0	98,87
			0,11	30,34	0	0	0,84	9,12	58,08	1,25	0	98,90
			0,3	0,13	0,23	0	0,28	66,73	31,27	0	0	98,66
			0,28	0,3	0,36	2,22	0,35	65,12	31,98	0	0	100,26
			0,28	0	0,23	1,02	0,41	65,46	30,96	0	0	97,96
	10	47	0,11	0,18	0,64	0,18	0,84	66,03	31,23	0	0	98,37
			0,06	0,32	0,55	0,19	0,9	66,69	31,63	0	0	99,44
2,4			0,32	1,36	0	0,66	61,57	35,29	0	0	100,94	
		50	0	0,35	0,53	0	0,85	66,40	31,28	0	0	98,56
			0	2,19	0,36	0	0,84	63,84	33,32	0	0	99,71
			0,09	1,1	0,43	0	0,85	64,77	32,05	0	0	98,44
		0	1,43	0,42	0	0,79	64,22	32,14	0	0	98,21	
11	55	0	0,45	2,65	0,13	0,25	64,77	32,00	0	0	100,00	
		0,19	0,55	2,36	0,13	0,21	63,03	31,63	0	0	97,88	
		0,26	0,47	2,53	0,15	0,16	63,65	32,04	0	0	99,09	
		1,31	0,32	2,46	0	0	62,61	33,02	0	0,33	100,05	
		0	0,28	1,62	5,12	1	60,88	31,94	0	0	99,84	
		0	0,38	1,55	5,09	0,96	59,87	31,58	0	0	98,47	
		0,19	0,27	1	0,15	0,28	65,61	31,37	0	0	98,59	
		51	0	0,2	0,51	1,49	1,02	65,59	31,42	0	0	99,21
			0,15	0,2	0,62	1,02	0,76	65,02	31,25	0	0	98,26
			0,21	0,52	0,57	0,89	0,74	64,84	31,79	0	0	98,82
			0,83	0,13	0,43	2,25	0,63	63,47	32,45	0	0	99,56
			0,3	0,9	0,53	3,41	0,75	63,09	33,07	0	0	101,30

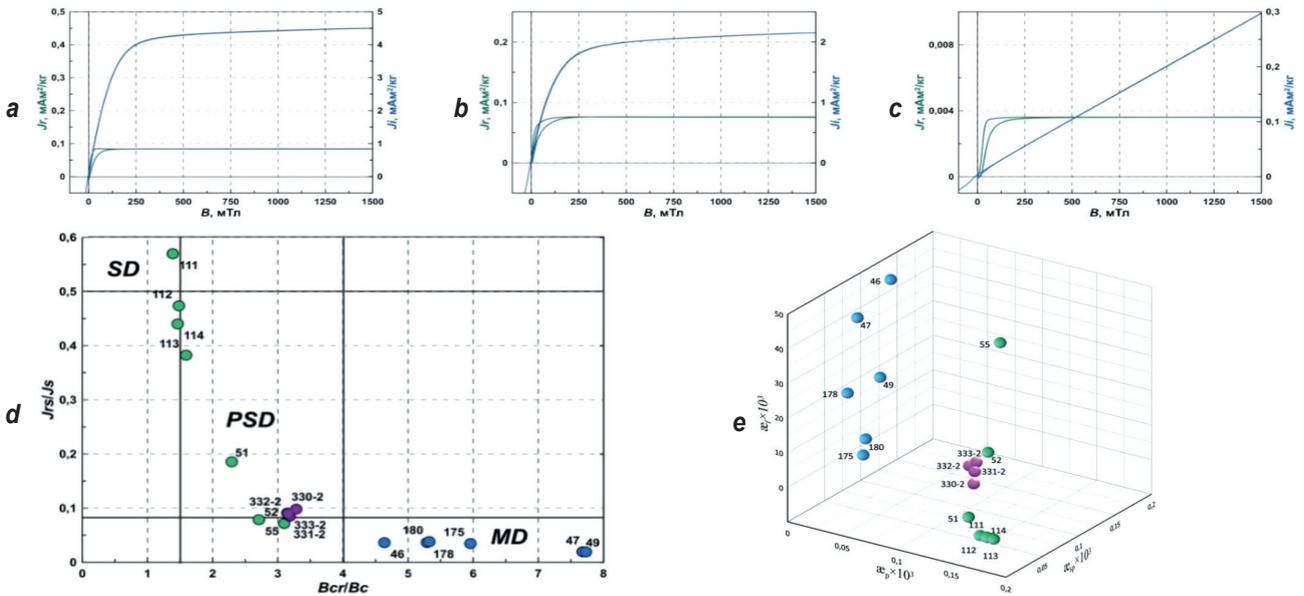


**Рис. 6. Результаты дифференциального термомагнитного анализа по индуктивной намагниченности  $J_i = f(T)$  габбро (а), беербахитов (б), долеритов (с) и норитов (д) Ольхонского региона**  
Красная и синяя линии – процессы нагрева и охлаждения  
**Fig. 6. Results of differential thermomagnetic analysis by inductive magnetization  $J_i = f(T)$  of gabbro (a), beerbachites (b), dolerites (c) and norites (d) of the Olkhon region**  
Red and blue lines – heating and cooling processes

Химический состав рудных минералов в изученных габброидах и беербахитах Ольхонского террейна достаточно хорошо коррелирует с результатами дифференциального термомагнитного анализа (см. рис. 6). Практически на всех термомагнитограммах по максимуму вто-

рой производной  $d^2J_i/dT^2$  устанавливается магнетит с точкой Кюри  $\Theta \approx 580 \text{ }^\circ\text{C}$ , в ряде случаев возможно присутствие примесей изоморфных ферромагнитных минералов (гётит, маггемит).

Согласно данным магнито-структурного анализа (рис. 7, а–с) изученные габброиды,



**Рис. 7. Результаты магнито-структурного анализа габброидов (синие кружочки), беербахитов (зеленые кружочки) и долеритов (сиреневые кружочки) Ольхонского региона:**  
а–с – петли гистерезиса индуцированной  $J_i$  (синяя) и остаточной  $J_r$  (зеленая) намагниченностей насыщения: а – габбро, образец 49, обнажение 23-10, б – нориты, образец 180, обнажение 23-38, с – беербахиты, образец 111, обнажение 23-23; д – диаграмма Дзю (SD, PSD, MD – области распределения, соответственно, одно-, псевдоодно- и многодоменных зерен); е – диаграмма рассеяния магнитной восприимчивости, показывающая ферро- ( $\alpha_f$ ), диа/пара- ( $\alpha_p$ ) и суперпарамагнитную ( $\alpha_{sp}$ ) ее составляющие  
Кружочки: синие – габброиды, зеленые – беербахиты, фиолетовые – долериты

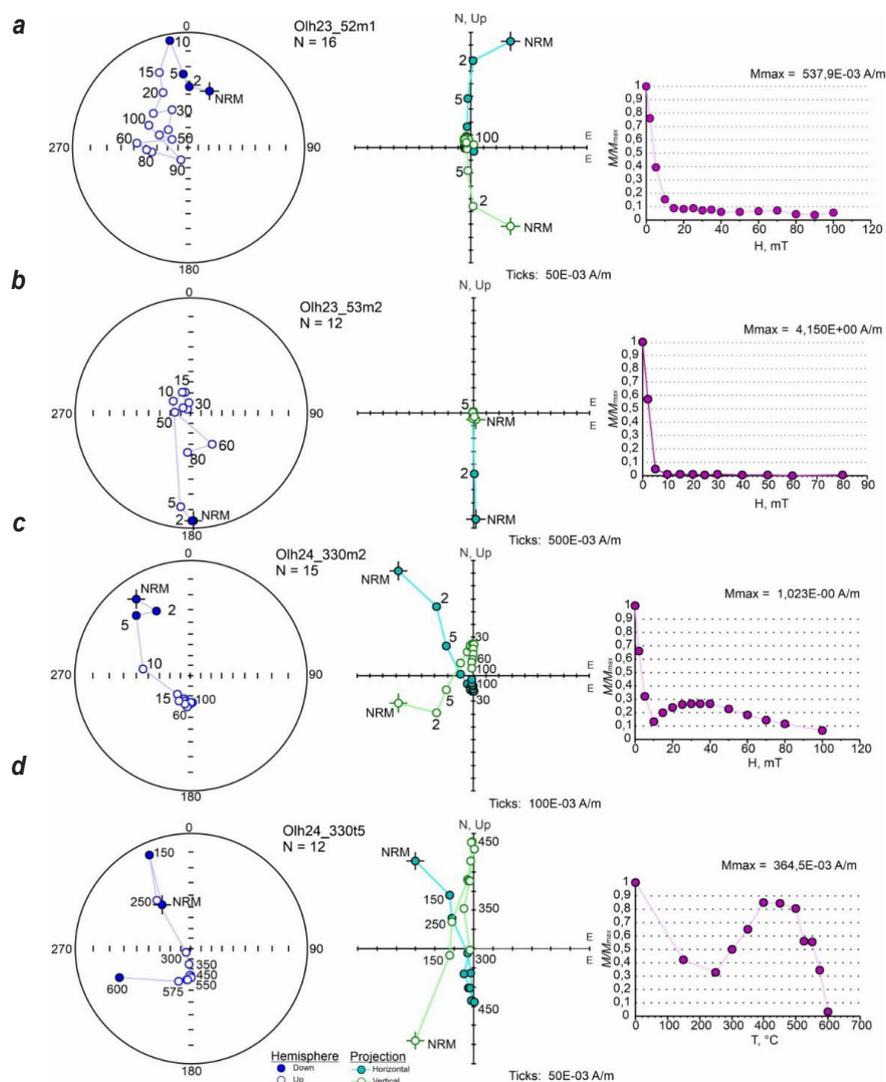
**Fig. 7. Results of magnetostructural analysis of gabbroids (blue circles), beerbachites (green circles) and dolerites (purple circles) of the Olkhon region:**  
а–с – hysteresis loops of induced  $J_i$  (blue) and remanent  $J_r$  (green) magnetizations of saturation: а – gabbro, sample 49, outcrop 23-10, б – norites, sample 180, outcrop 23-38, с – beerbachites, sample 111, outcrop 23-23;  
д – Day diagram (SD, PSD, MD – distribution areas of single-, pseudo-single- and multidomain grains, respectively);  
е – magnetic susceptibility scatter diagram showing its ferro- ( $\alpha_f$ ), dia/para- ( $\alpha_p$ ) and superparamagnetic ( $\alpha_{sp}$ ) components  
Circles: blue – gabbroids, green – beerbachites, purple – dolerites



беербахиты и долериты характеризуются разным строением зерен минералов ферромагнитной фракции (рис. 7, d, e). Несмотря на то что по составляющей магнитной восприимчивости габброиды относятся к ферромагнитной фракции, в них преобладают многодоменные частицы. В то же время минералы ферромагнитной фракции беербахитов, имеющие повышенную парамагнитную составляющую магнитной восприимчивости, могут характеризоваться псевдо- и однодоменным строением. Причем беербахиты Крестовского массива (образцы 111–114, обнажение 23-23) стремятся сгруппироваться ближе к однодоменной области. Долериты постколлизийной дайки (образцы 330–333, обнажение 24-60) также характеризуются псевдооднодоменной структурой минералов ферромагнитной фракции.

В этой связи беербахиты и долериты имеют более высокую вероятность сохранности векторов характеристической естественной остаточной намагниченности для изучения их палеомагнетизма.

В ходе лабораторных размагничиваний температурой и переменным магнитным полем в беербахитах и долеритах были установлены крутые отрицательные векторы характеристической естественной остаточной намагниченности (рис. 8), по которым рассчитаны виртуальные геомагнитные полюсы в географической (современной) системе координат (табл. 3). Полученные палеомагнитные данные по Приольхонью достаточно хорошо согласуются с позднепалеозойской естественной остаточной намагниченностью, установленной в дайковых роях юга Сибирской платформы [37].



**Рис. 8. Палеомагнитные исследования базитов Ольхонского региона:**  
a, b – беербахиты, обнажение 23-11; c, d – постколлизийные долериты, обнажение 24-60  
**Fig. 8. Palaeomagnetic studies of Olkhon region basites:**  
a, b – beerbachites, outcrop 23-11; c, d – postcollisional dolerites, outcrop 24-60



**Таблица 3. Палеомагнитные характеристики петрофизических таксонов Ольхонского геодинамического полигона (географическая система координат)**  
**Table 3. Paleomagnetic characteristics of petrophysical taxa of the Olkhon geodynamic polygon (geographic coordinate system)**

Объект	<i>n</i>	<i>D</i> , град.	<i>J</i> , град.	<i>k</i> , град.	$\alpha_{95}$ , град.	$\Phi$ , град.	$\Lambda$ , град.	<i>dp/dm</i> , град.	<i>fm</i> , град.
Беербахиты, обнажение 23-11	5	286	-78	16,7	19,3	42	137	34,2/36,3	67
Долериты, дайка постколлизийная, обнажение 24-60	7	158	-72	12,4	17,9	77	48	28,3/31,8	58

*Примечание.*  $\varphi = 52^\circ 54'$ ;  $\lambda = 106^\circ 38'$ ; *n* – количество образцов, участвующих в статистике. Параметры группировки векторов характеристической естественной остаточной намагниченности: *D* – склонение; *J* – наклонение; *k* – кучность;  $\alpha_{95}$  – овал доверия с вероятностью 95 %. Виртуальный геомагнитный полюс:  $\Phi$  – широта;  $\Lambda$  – долгота; *dp/dm* – полуоси овала доверия; *fm* – палеоширота.

### Заключение

В ходе выполнения петрофизических работ в Приольхонье (см. рис. 1 и 2) были получены два основных результата.

1. Рассчитаны дескриптивные характеристики (средние значения, ошибки и т. п.) петрофизических параметров (плотность, намагниченность) наиболее важных петрофизических таксонов (см. табл. 1, рис. 4). На этой фактографии заложена современная основа петрофизической легенды Приольхонья, которую в перспективе целесообразно использовать в физико-геологическом моделировании и для уточнения аэрокосмической геологической карты.

2. Установлены палеомагнитные направления беербахитов и долеритов (см. рис. 8, табл. 3). Основным минералом-носителем характеристической естественной остаточной намагниченности является магнетит с точкой

Кюри около 580 °С (см. рис. 6), обладающей псевдо-и однодоменной структурой (см. рис. 7). Данный вывод надежно подтверждается проведенными аналитическими исследованиями (см. табл. 2). Предварительная геодинамическая интерпретация полученных палеомагнитных данных допускает, что сформировавшие векторы характеристической естественной остаточной намагниченности тектоно-магматические процессы происходили позже (возможно, средний палеозой) коллизийных событий Сибирской платформы и Ольхонского террейна и связанных с ними процессами метаморфизма. Дальнейшие исследования петрофизических таксонов Приольхонья по доказательству природы векторов характеристической естественной остаточной намагниченности помогут при уточнении истории геодинамического развития региона (см. рис. 3).

### Список источников

1. Федоровский В.С., Скляр Е.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Донская Т.В., Лавренчук А.В. [и др.]. Коллизийная система Западного Прибайкалья: аэрокосмическая геологическая карта Ольхонского региона (Байкал, Россия) // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 3. С. 447–452. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0485>. EDN: YVJJJH.
2. Турутанов Е.Х. Морфология базитовых интрузий Ольхонского региона по гравимагнитным данным (Западное Прибайкалье). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. 208 с.
3. Черский И.Д. О результатах исследования озера Байкал // Записки Восточно-Сибирского отделения Русского географического общества. 1862. Т. 15. № 3. 78 с.
4. Салоп Л.И. Геология Байкальской горной области. Т. 2. М.: Недра, 1967. 699 с.
5. Новосёлова М.Р., Зорин Ю.А. Строение земной коры и верхней мантии Байкальской рифтовой зоны и возможности прогноза сейсмичности // Результаты комплексных геофизических исследований в сейсмоопасных зонах. М.: Наука, 1978. С. 101–126.
6. Федоровский В.С., Владимиров А.Г., Хаин Е.В., Каргополов С.А., Гибшер А.С., Изох Э.А. Тектоника, метаморфизм и магматизм коллизийных зон каледонид Центральной Азии // Геотектоника. 1995. № 3. С. 3–22.
7. Fedorovsky V.S., Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Khromykh S.V., Mazukabzov A.M., Mekhonoshin A.S., et al. The Ol'khon collision system (Baikal region) // Structural and tectonic correlation across the Central Asia orogenic collage: northeastern segment (Guidebook and abstract volume of the Siberian Workshop IGCP-480) / Ed. E.V. Sklyarov. Irkutsk: Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2005. P. 3–76.



8. Федоровский В.С., Скляр Е.В., Изох А.Э., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М. Сдвиговый тектогенез и щелочнобазитовый магматизм в коллизионной системе каледонид Западного Прибайкалья // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 682–700. EDN: MKTVKR.
9. Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Cho M., Sergeev S.A., et al. Pre-collisional ( $\leq 0.5$  Ga) complexes of the Olkhon terrane (southern Siberia) as an echo of events in the Central Asian orogenic belt // *Gondwana Research*. 2017. Vol. 42. P. 243–263. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.016>.
10. Gladkochub Д.П., Донская Т.В., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М., Ларионов А.Н., Сергеев С.А. Ольхонский метаморфический террейн Прибайкалья: раннепалеозойский композит фрагментов неопротерозойской активной окраины // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 571–588. EDN: MKTVFH.
11. Добрецов Н.Л., Буслов М.М. Позднекембрийско-ордовикская тектоника и геодинамика Центральной Азии // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 1. С. 93–108. EDN: HYIVZT.
12. Юдин Д.С., Хромых С.В., Мехоношин А.С., Владимиров А.Г., Травин А.В. Колотилина Т.Б. [и др.].  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраст и геохимические признаки синколлизионных габброидов и гранитов Западного Прибайкалья (на примере Биржинского массива и его складчатого обрамления) // Доклады Академии наук. 2005. Т. 405. № 2. С. 251–255. EDN: HSFUBN.
13. Владимиров А.Г., Изох А.Э., Поляков Г.В., Бабин Г.А., Мехоношин А.С., Крук Н.Н. [и др.]. Габбро-гранитные интрузивные серии и их индикаторное значение для геодинамических реконструкций // Петрология. 2013. Т. 21. № 2. С. 177. <https://doi.org/10.7868/S0869590313020076>. EDN: PUAVAD.
14. Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Wingate M.T.D., Poller U., Kröner A., Fedorovsky V.S., et al. Petrology, geochronology, and tectonic implications of c. 500 Ma metamorphic and igneous rocks along the northern margin of the Central-Asian orogen (Olkhon terrane, Lake Baikal, Siberia) // *Journal of the Geological Society*. 2008. Vol. 165. P. 235–246. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-125>.
15. Скляр Е.В., Лавренчук А.В., Федоровский В.С., Gladkochub Д.П., Донская Т.В., Котов А.Б. [и др.]. Региональный, контактовый метаморфизм и автометаморфизм Ольхонского террейна (Западное Прибайкалье) // Петрология. 2020. Т. 28. № 1. С. 55–71. <https://doi.org/10.31857/S0869590320010057>. EDN: IWBLAT.
16. Константинов К.М. Время и геодинамическая позиция формирования метасоматитов Мамской кристаллической полосы по палеомагнитным данным (Байкальская складчатая область) // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент: материалы семинара (пос. Борок, 19–22 октября 2006 г.). М.: Издательство ГЕОС, 2006. С. 84–88.
17. Беличенко В.Г., Скляр Е.В., Добрецов Н.Л., Томуртоого О. Геодинамическая карта Палеоазиатского океана. Восточный сегмент // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 7–8. С. 29–40.
18. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. В 2 кн. Кн. 1. М.: Недра, 1990. 328 с.
19. Stanevich A.M., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Konstantinov K.M. Biolithogenic settings in neoproterozoic marginal seas of the Paleasian ocean // *Gondwana Research*. 2001. Vol. 4. Iss. 4. P. 788–789. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70572-4](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70572-4).
20. Никишин А.М., Соборнов К.О., Прокопьев А.В., Фролов С.В. Тектоническая история Сибирской платформы в венде-фанерозе // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2010. № 1. С. 3–16. EDN: LAJYOV.
21. Скляр Е.В., Федоровский В.С., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Мазукабзов А.М., Левицкий В.И. [и др.]. Карбонатиты в коллизионных обстановках и квазикарбонатиты Ольхонской коллизионной системы // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 12. С. 1409–1427. EDN: KZAXUL.
22. Sklyarov E.V., Kargopolov S.A., Lavrenchuk A.V., Pushkarev E.V., Semenova D.V. Geology, petrology and mineralogy of hornfels-like rocks (beerbachite) in the Early Paleozoic Olkhon collisional orogen (West Baikal area, Russia) // *Minerals*. 2023. Vol. 13. P. 1370. <https://doi.org/10.3390/min13111370>.
23. Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Fedorovsky V.S., Pushkarev E.V., Semenova D.V., Starikova A.E. Dismembered ophiolite of the Olkhon composite terrane (Baikal, Russia): petrology and emplacement // *Minerals*. 2020. Vol. 10. Iss. 4. P. 305. <https://doi.org/10.3390/min10040305>.
24. Лавренчук А.В., Скляр Е.В., Изох А.Э., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Федоровский В.С. [и др.]. Особенности состава габброидов Крестовской зоны (Западное Прибайкалье) как отражение взаимодействия надсубдукционной литосферной мантии с мантийным плюмом // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 10. С. 1439–1458. <https://doi.org/10.15372/GiG20171001>. EDN: ZNJACF.
25. Скляр Е.В., Лавренчук А.В., Семенова Д.В. Ассимиляция карбонатов базитовыми магмами: фассаитовые габбро Ольхонского террейна (Западное Прибайкалье) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 519. № 1. С. 453–463. <https://doi.org/10.31857/S2686739724110093>. EDN: AGIDBR.
26. Скляр Е.В., Лавренчук А.В., Пушкарев Е.В., Старикова А.Е., Степанов К.М. Беербахиты Приольхонья: геологическая позиция, минералогия и механизмы образования // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): сб. тр. конф. (г. Иркутск, 17–20 октября 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2017. Т. 15. С. 254–257. EDN: ZVYDHT.
27. Мазукабзов А.М., Федоровский В.С. Коллизионный шов системы Сибирский кратон – Ольхонский террейн в Западном Прибайкалье // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): сб. тр. конф. (г. Иркутск, 17–20 октября 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2017. Т. 15. С. 174–175. EDN: ZVPSLT.
28. Zijdeveld J.D.A. Demagnetization of rocks, analysis of results // *Methods in paleomagnetism* / eds. S.K. Runcorn, K.M. Creer, D.W. Collinson. Amsterdam: Elsevier, 1967. P. 254–286.



29. Day R., Fuller M.D., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and composition dependence // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1977. Vol. 13. P. 260–267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X).
30. Dunlop D.J., Ozdemir O. *Rock magnetism. Fundamentals and frontiers*. N.Y.: Cambridge University Press, 1997. 573 p.
31. Kosareva L.R., Nourgaliev D.K., Kuzina D.M., Spassov S., Fattakhov A.V. Ferromagnetic, dia-/paramagnetic and superparamagnetic components of Aral sea sediments: significance for paleoenvironmental reconstruction // *ARPN Journal of Earth Sciences*. 2015. Vol. 4. Iss. 1. P. 1–6.
32. Буров Б.В., Ясонов П.Г. Введение в дифференциальный термомагнитный анализ горных пород. Казань: Изд-во Казанского университета, 1979. 160 с.
33. Боровиков В.П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2001. 658 с.
34. Enkin R.J. A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Sidney: The Pacific Geoscience Centre, 1994. 16 p.
35. Константинов К.М., Забелин А.В., Зайцевский Ф.К., Константинов И.К., Киргуев А.А., Хороших М.С. Структура и функции петромагнитной базы данных “RSEARCH” Якутской кимберлитовой провинции // *Геоинформатика*. 2018. № 4. С. 30–39. EDN: YPXHRB.
36. Akimoto S. Magnetic properties of FeO – Fe<sub>2</sub>O – TiO<sub>2</sub> system as a basis of rock magnetism // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1961. Vol. 17. P. 706–710.
37. Константинов К.М., Хузин М.З., Гладкочуб Д.П. Позднепалеозойская естественная остаточная намагниченность дайковых роев юга Сибирской платформы // *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): материалы совещания*. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2006. В 2 т. Т. 1. № 4. С. 171–174.

### References

1. Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Donskaya T.V., Lavrenchuk A.V., et al. Collision system of West Pribaikalie: aerospace geological map of Olkhon region (Baikal, Russia). *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020;11(3):447-452. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0485>. EDN: YVJJIH.
2. Turutanov E.Kh. *Morphology of the Olkhon region mafic intrusions according to gravimagnetic data (Western Baikal region)*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2011, 208 p. (In Russ.).
3. Cherskii I.D. On study results of Lake Baikal. *Zapiski Vostochno-Sibirskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 1862;15(3):78. (In Russ.).
4. Salop L.I. *Geology of the Baikal mountain region*. Vol. 2. Moscow: Nedra; 1967, 699 p. (In Russ.).
5. Novoselova M.R., Zorin Yu.A. Structure of the Baikal rift zone earth's crust and upper mantle and seismicity forecasting possibilities. In: *Rezultaty kompleksnykh geofizicheskikh issledovaniy v seismoopasnykh zonakh = Results of integrated geophysical studies in seismic zones*. Moscow: Nauka; 1978, p. 101-126. (In Russ.).
6. Fedorovskii V.S., Vladimirov A.G., Khain E.V., Kargopolov S.A., Gibsher A.S., Izokh E.A. Tectonics, metamorphism and magmatism of the collision zones of the caledonides of Central Asia. *Geotektonika*. 1995;3:3-22. (In Russ.).
7. Fedorovsky V.S., Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Khromykh S.V., Mazukabzov A.M., Mekhonoshin A.S., et al. The Ol'khon collision system (Baikal region). In: Sklyarov E.V. (ed.). *Structural and tectonic correlation across the Central Asia orogenic collage: northeastern segment (Guidebook and abstract volume of the Siberian Workshop IGCP-480)*. Irkutsk: Institute of the Earth Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2005, p. 3-76.
8. Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Mazukabzov A.M., Izokh A.E., Lavrenchuk A.V., Kotov A.B. Strike-slip tectogenesis and alkaline mafic magmatism in the collision system of the Western Baikal region caledonides. *Geologiya i geofizika*. 2010;51(5):682-700. (In Russ.). EDN: MKTVKR.
9. Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Cho M., Sergeev S.A., et al. Pre-collisional (≤0.5 Ga) complexes of the Olkhon terrane (southern Siberia) as an echo of events in the Central Asian orogenic belt. *Gondwana Research*. 2017;42:243-263. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.016>.
10. Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Fedorovskii V.S., Mazukabzov A.M., Larionov A.N., Sergeev S.A. Olkhon metamorphic terrane of the Baikal region: Early Paleozoic composite of Neoproterozoic active margin fragments. *Geologiya i geofizika*. 2010;51(5):571-588. (In Russ.). EDN: MKTVFH.
11. Dobretsov N.L., Buslov M.M. Late Cambrian-Ordovician tectonics and geodynamics of Central Asia. *Geologiya i geofizika*. 2007;48(1):93-108. (In Russ.). EDN: HYIVZT.
12. Yudin D.S., Khromykh S.V., Vladimirov A.G., Travin A.V., Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B., et al. 40AR/39AR-age and geochemical features of syncollisional gabbroids and granites of the Western Baikal region (on example of the Birkha massif and its folded framing). *Doklady Akademii Nauk*. 2005;405(2):251-255. (In Russ.). EDN: HSFUBN.
13. Vladimirov A.G., Izokh A.E., Polyakov G.V., Babin G.A., Mekhonoshin A.S., Kruk N.N., et al. Gabbro-granite intrusive series and their indicator value for geodynamic reconstructions. *Petrologia*. 2013;21(2):177. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869590313020076>. EDN: PUAVAD.
14. Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Wingate M.T.D., Poller U., Kröner A., Fedorovsky V.S., et al. Petrology, geochronology, and tectonic implications of c. 500 Ma metamorphic and igneous rocks along the northern margin of the Central-Asian orogen (Olkhon terrane, Lake Baikal, Siberia). *Journal of the Geological Society*. 2008;165:235-246. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-125>.



15. Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Fedorovskii V.S., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Kotov A.B., et al. Regional, contact metamorphism and autometamorphism of the Olkhon terrane (Western Baikal region). *Petrologia*. 2020;28(1):55-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869590320010057>. EDN: IWBLAT.
16. Konstantinov K.M. Time and geodynamic position of Mamacrystalline band formation of metasomatites according to paleomagnetic data (Baikal folded region). In: *Paleomagnetizm i magnetizm gornykh porod: teoriya, praktika, eksperiment: materialy seminarov = Palaeomagnetism and magnetism of rocks: theory, practice, experiment: seminar materials*. 19–22 October 2006, Borok. Moscow: Izdatel'stvo GEOS; 2006, p. 84-88.
17. Belichenko V.G., Sklyarov E.V., Dobretsov N.L., Tomurtogoo O. Geodynamic map of the Paleoasian ocean. Eastern segment. *Geologiya i geofizika*. 1994;35(7-8):29-40. (In Russ.).
18. Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M. *Lithospheric plate tectonics on the territory of the USSR*. In 2 books. Book 1. Moscow: Nedra; 1990, 328 p. (In Russ.).
19. Stanevich A.M., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Konstantinov K.M. Biolithogenic settings in neoproterozoic marginal seas of the Paleoasian ocean. *Gondwana Research*. 2001;4(4):788-789. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70572-4](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70572-4).
20. Nikishin A.M., Sobornov K.O., Prokopiev A.V., Frolov S.V. Vendian to Phanerozoic tectonic history of the Siberian platform region. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 4: Geologiya*. 2010;1(3-16). (In Russ.). EDN: LAJYOV.
21. Sklyarov E.V., Fedorovskii V.S., Kotov A.B., Lavrenchuk A.V., Mazukabzov A.M., Levitskii V.I., et al. Olkhon collisional system carbonates in collisional settings and quasi-carbonatites. *Geologiya i geofizika*. 2009;50(12):1409-1427. (In Russ.). EDN: KZAXUL.
22. Sklyarov E.V., Kargopolov S.A., Lavrenchuk A.V., Pushkarev E.V., Semenova D.V. Geology, petrology and mineralogy of hornfels-like rocks (beerbachite) in the Early Paleozoic Olkhon collisional orogen (West Baikal area, Russia). *Minerals*. 2023;13:1370. <https://doi.org/10.3390/min13111370>.
23. Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Fedorovsky V.S., Pushkarev E.V., Semenova D.V., Starikova A.E. Dismembered ophiolite of the Olkhon composite terrane (Baikal, Russia): petrology and emplacement. *Minerals*. 2020;10(4):305. <https://doi.org/10.3390/min10040305>.
24. Lavrenchuk A.V., Sklyarov E.V., Izokh A.Eh., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Fedorovskii V.S., et al. Compositional features of Krestovskaya area gabbroids (Western Baikal region) as a reflection of suprasubduction lithospheric mantle interaction with mantle plume. *Geologiya i geofizika*. 2017;58(10):1439-1458. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG20171001>. EDN: ZNJACF.
25. Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Semenova D.V. Assimilation of carbonates by mafic magma: fassaite gabbro of the Olkhon terrane (Western Baikal region). *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2024;519(1):453-463. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2686739724110093>. EDN: AGIDBR.
26. Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Pushkarev E.V., Starikova A.E., Stepanov K.M. Beerbachites of the Olkhon region: geological position, mineralogy and formation mechanisms. In: *Geodinamicheskaya ehvolyutsiya litosfery Tsentralno-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): sb. tr. konf. = Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from the ocean to the continent): conference proceedings*. 17–20 October 2017, Irkutsk. Irkutsk: Institute of the Earth Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, vol. 15, p. 254-257. (In Russ.). EDN: ZVYDHT.
27. Mazukabzov A.M., Fedorovskii V.S. Collision suture of the Siberian craton – Olkhon terrane system in the Western Baikal region. In: *Geodinamicheskaya ehvolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): sb. tr. konf. = Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from the ocean to the continent): conference proceedings*. 17–20 October 2017, Irkutsk. Irkutsk: Institute of the Earth Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, vol. 15, p. 174-175. (In Russ.). EDN: ZVPSLT.
28. Zijdeveld J.D.A. Demagnetization of rocks, analysis of results. In: S.K. Runcorn, K.M. Creer, W. Collinson (eds). *Methods in paleomagnetism*. Amsterdam: Elsevier; 1967, p. 254-286.
29. Day R., Fuller M.D., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and composition dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1977;13:260-267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X).
30. Dunlop D.J., Ozdemir O. *Rock magnetism. Fundamentals and frontiers*. New York: Cambridge University Press; 1997, 573 p.
31. Kosareva L.R., Nourgaliev D.K., Kuzina D.M., Spassov S., Fattakhov A.V. Ferromagnetic, dia-/paramagnetic and superparamagnetic components of Aral sea sediments: significance for paleoenvironmental reconstruction. *ARP Journal of Earth Sciences*. 2015;4(1):1-6.
32. Burov B.V., Yasonov P.G. *Introduction to differential thermomagnetic analysis of rocks*. Kazan: Kazan Federal University; 1979, 160 p. (In Russ.).
33. Borovikov V.P. *STATISTICA: the art of computer data analysis. For professionals*. Saint Petersburg: Piter; 2001, 658 p. (In Russ.).
34. Enkin R.J. *A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data*. Sidney: The Pacific Geoscience Centre; 1994, 16 p.
35. Konstantinov K.M., Zabelin A.V., Zaitsevskiy F.K., Konstantinov I.K., Kirguez A.A., Khoroshikh M.S. Structure and functions of the petromagnetic "RSEARCH" database of the Yakut kimberlite province. *Geoinformatika*. 2018;4:30-39. (In Russ.). EDN: YPXHRB.
36. Akimoto S. Magnetic properties of FeO – Fe<sub>2</sub>O – TiO<sub>2</sub> system as a basis of rock magnetism. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1961;17:706-710.



37. Konstantinov K.M., Khuzin M.Z., Gladkochub D.P. Late Paleozoic natural remanent magnetization of dike swarms in the southern Siberian platform. In: *Geodinamicheskaya ehvolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): materialy soveshchaniya = Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from the ocean to the continent): meeting materials*. Irkutsk: Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2006, in 2 vol., vol. 1, iss. 4, p. 171-174. (In Russ.).

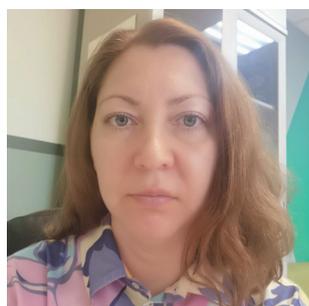
#### Information about the authors / Информация об авторах



**Константинов Константин Михайлович**,  
доктор геолого-минералогических наук,  
руководитель департамента геофизики,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
✉ konstantinovkm@ex.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>  
**Konstantin M. Konstantinov**,  
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Head of the Geophysics Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
✉ konstantinovkm@ex.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>



**Склярв Евгений Викторович**,  
доктор геолого-минералогических наук,  
член-корреспондент РАН, профессор,  
заведующий лабораторией палеогеодинамики,  
Институт земной коры СО РАН,  
г. Иркутск, Россия,  
skl@crust.irk.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9194-5506>  
**Evgeny V. Sklyarov**,  
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor,  
Head of the Palaeogeodynamics Laboratory,  
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,  
skl@crust.irk.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9194-5506>



**Косарева Лина Раисовна**,  
кандидат геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт геологии и нефтегазовых технологий,  
Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
г. Казань, Россия,  
lina.kosareva@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0969-1261>  
**Lina R. Kosareva**,  
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Senior Researcher,  
Institute of Geology and Oil and Gas Technologies,  
Kazan (Volga region) Federal University,  
Kazan, Russia,  
lina.kosareva@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0969-1261>



**Лавренчук Андрей Всеволодович,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории петрологии  
и рудоносности магматических формаций,  
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
г. Новосибирск, Россия,  
доцент кафедры минералогии и геохимии,  
Новосибирский государственный университет,  
г. Новосибирск, Россия,  
alavr@igm.nsc.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-2833-1405>

**Andrey V. Lavrenchuk,**  
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Senior Researcher of the Laboratory of Petrology  
and Ore-bearing Igneous Formations,  
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russia,  
Associate Professor of the Mineralogy and Geochemistry Department,  
Novosibirsk State University,  
Novosibirsk, Russia,  
alavr@igm.nsc.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-2833-1405>



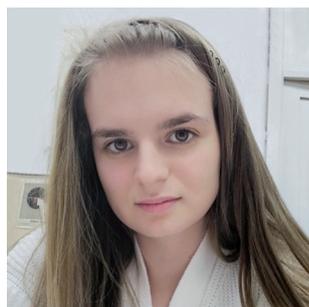
**Пушкарев Евгений Владимирович,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
заведующий лабораторией петрологии магматических формаций,  
Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого  
Уральского отделения РАН,  
г. Екатеринбург, Россия,  
pushkarev@igg.uran.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0912-8580>

**Evgeny V. Pushkarev,**  
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Head of the Laboratory of Petrology of Igneous Formations,  
Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry  
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Ekaterinburg, Russia,  
pushkarev@igg.uran.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0912-8580>



**Константинов Герман Константинович,**  
студент,  
техник 1 категории департамента геофизики,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
hkonstantinov@bk.ru  
<https://orcid.org/0009-0002-0514-9843>

**German K. Konstantinov,**  
Student,  
1<sup>st</sup> Category Technician of the Geophysics Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
hkonstantinov@bk.ru  
<https://orcid.org/0009-0002-0514-9843>



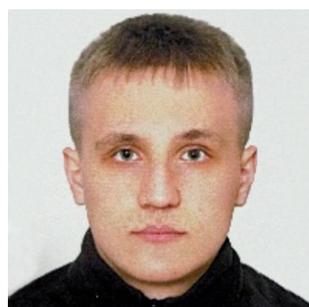
**Воробьева Полина Никитична,**  
студент,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
vpolina23111888@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0005-3443-6472>  
**Polina N. Vorobyeva,**  
Student,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
vpolina23111888@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0005-3443-6472>



**Дугарова Аяна Евгеньевна,**  
студент,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
техник-геофизик,  
ООО «Сигма-Гео»,  
г. Иркутск, Россия,  
ayanadugarova@bk.ru  
<https://orcid.org/0009-0002-5929-136X>  
**Ayana E. Dugarova,**  
Student,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Geophysical Technician,  
Sigma-Geo LLC,  
Irkutsk, Russia,  
ayanadugarova@bk.ru  
<https://orcid.org/0009-0002-5929-136X>



**Перова Вероника Александровна,**  
студент,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
техник-геофизик,  
ООО «Сигма-Гео»,  
г. Иркутск, Россия,  
ronnipeperonni@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0007-3166-2399>  
**Veronika A. Perova,**  
Student,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Geophysical Technician,  
Sigma-Geo LLC,  
Irkutsk, Russia,  
ronnipeperonni@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0007-3166-2399>



**Пилипенко Николай Иванович,**  
студент,  
Институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
nik.pilipenko.03@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0001-9327-1517>

**Nikolay I. Pilipenko,**

Student,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
nik.pilipenko.03@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0001-9327-1517>

**Сиселятин Егор Андреевич,**

студент,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
e.siselyatin@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0004-6749-213>

**Egor A. Siselyatin,**

Student,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
e.siselyatin@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0004-6749-213>

**Тулесонова Эржена Баировна,**

студент,  
Институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
tulesonova29099@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0002-7950-5900>

**Erzhena B. Tulesonova,**

Student,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
tulesonova29099@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0002-7950-5900>

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

К.М. Константинов – разработка концепции, проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Е.В. Складаров – проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Л.Р. Косарева – проведение исследования, написание черновика рукописи.

А.В. Лавренчук – проведение исследования, редактирование рукописи.

Е.В. Пушкарев – проведение исследования.

Г.К. Константинов – проведение исследования, формальный анализ.

П.Н. Воробьева – проведение исследования.

А.Е. Дугарова – проведение исследования, визуализация.

В.А. Перова – проведение исследования, визуализация.

Н.И. Пилипенко – проведение исследования.

Е.А. Сиселятин – проведение исследования.

Э.Б. Тулесонова – проведение исследования.

Konstantin M. Konstantinov – conceptualization, investigation, writing – original draft, writing – editing.

Evgeny V. Sklyarov – investigation, writing – original draft, writing – editing.

Lina R. Kosareva – investigation, writing – original draft.

Andrey V. Lavrenchuk – investigation, writing – editing.

Evgeny V. Pushkarev – investigation.

German K. Konstantinov – investigation, formal analysis.

Polina N. Vorobeva – investigation.

Ayana E. Dugarova – investigation, visualization.

Veronika A. Perova – investigation, visualization.



Nikolay I. Pilipenko – investigation.  
Egor A. Siselyatin – investigation.  
Erzhena B. Tulesonova – investigation.

#### **Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.  
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 07.02.2025; одобрена после рецензирования 18.02.2025; принята к публикации 17.03.2025.

The article was submitted 07.02.2025; approved after reviewing 18.02.2025; accepted for publication 17.03.2025.