



Научная статья

УДК 550.8

EDN: SIZYEB

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-2-6

Физико-геологическое моделирование интрузии долеритов коллизийного шва системы Сибирский кратон – Ольхонский террейн (Западное Прибайкалье)

К.М. Константинов^{а,✉}, С.В. Гаченко^б, Г.К. Константинов^в, И.К. Константинов^д,
А.С. Лаппо^е, В.А. Панкевич^ф, А.А. Светлаков^г, Е.А. Сиселятин^h

^{а-г}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

Резюме. Приольхонье представляет собой ключевую структуру (геодинамический полигон), через которую проходит граница между Сибирским кратоном и Центрально-Азиатским складчатым поясом. В связи с этим выяснить историю их взаимодействия во времени и пространстве – интересная и актуальная задача, благодаря решению которой представляется хорошая возможность обсудить перспективы иной, чем прежде, интерпретации массива новых геолого-геофизических данных по Западному Прибайкалью. Целью физико-геологического моделирования является уточнение геологического строения коллизийного шва системы Сибирский кратон – Ольхонский террейн для создания геологических карт нового поколения. Для этого на участке реки Анги, где развиты метаморфические образования коллизийного шва, проведены наземная магнитная съемка и петрофизические исследования с отбором ориентированных образцов из бластомилонитов разных типов и прорывающих их долеритов, возраст которых составляет 500–470 и 290 млн лет соответственно. По мнению геологов, долериты слагают дайку северо-восточного простирания мощностью не более 5 м и протяженностью до 2 км. Новая информация по геохронологии, петро- и палеомагнетизму рассматриваемых долеритов входит в противоречие с этой гипотезой. Выполненное физико-геологическое моделирование показало, что долериты слагают интрузивное тело более сложной формы, чем дайка (вероятнее всего, силл мощностью ≈ 200 м), и позволило найти компромиссное решение по интерпретации полученного ранее материала. На его основе можно судить о проявлении здесь достаточно активных тектоно-магматических событий в раннепермскую эпоху, вероятнее всего, связанных со становлением Ангаро-Витимского батолита в Забайкалье. По полученным образцам ($N = 19$) после введения тектонической поправки за элементы залегания главного сместителя Приморского разлома рассчитан виртуальный геомагнитный полюс, соответствующий ранней перми (295–275 млн лет), с координатами: $F = 45^\circ$ с. ш., $L = 133^\circ$ в. д., $dp/dm = 18,2/19,0^\circ$. Таким образом, для уточнения Аэрокосмической геологической карты и истории геодинамического развития Приольхонья предлагается включение в исследования широкого комплекса геофизических методов.

Ключевые слова: Западное Прибайкалье, Сибирский кратон, Ольхонский террейн, Центрально-Азиатский складчатый пояс, коллизийный шов, Аэрокосмическая геологическая карта, петрофизическая легенда, физико-геологическая модель

Финансирование. Исследования велись в рамках проектной деятельности студентов Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия) 2024–2025 гг.

Для цитирования: Константинов К.М., Гаченко С.В., Константинов Г.К., Константинов И.К., Лаппо А.С., Панкевич В.А. [и др.]. Физико-геологическое моделирование интрузии долеритов коллизийного шва системы Сибирский кратон – Ольхонский террейн (Западное Прибайкалье) // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 2. С. ?–?. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-2-6>. EDN: SIZYEB.



Original article

Physical and geological modeling of dolerite intrusion at collisional suture of Siberian craton – Olkhon terrane system (Western Baikal region)

Konstantin M. Konstantinov^{a✉}, Sergey V. Gachenko^b, German K. Konstantinov^c,
Innokenty K. Konstantinov^d, Artem S. Lappo^e, Veronika A. Pankevich^f,
Andrei A. Svetlakov^g, Egor A. Siselyatin^h

^{a–h}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The Olkhon region is a key structure (geodynamic polygon) straddling the boundary between the Siberian craton and the Central Asian folded belt. In this regard, finding out the history of their interaction in time and space is an interesting and relevant task, the solution of which provides a good opportunity to discuss the prospects for a different interpretation of the array of new geological and geophysical data for the Western Baikal region. The purpose of physical and geological modeling is to clarify the geological structure of the collisional suture of the Siberian craton – Olkhon terrane system to create next-generation geological maps. For this purpose, ground magnetic surveys and petrophysical studies have been conducted at the Anga river section where collisional suture metamorphic features are prominent. These studies included the collection of oriented samples from blastomylonites of various types and the intruding dolerites, aged 500–470 and 290 million years, respectively. According to geologists, dolerites form a dike of northeastern strike, no more than 5 m thick and up to 2 km long. New information on geochronology, petro- and paleomagnetism of the considered dolerites contradicts this hypothesis. The performed physical-geological modeling showed that the dolerites form an intrusive body of a more complex shape than the dike (most likely a sill about 200 m thick), and made it possible to find a compromise solution for the interpretation of previously obtained material. On this basis, it is possible to conclude that fairly active tectono-magmatic events occurred here in the Early Permian, which most likely were associated with the formation of the Angara-Vitim batholith in Transbaikalia. According to the obtained samples ($N = 19$), after introducing a tectonic correction for the bedding elements of the main fault plane of the Primorsky fault, a virtual geomagnetic pole has been calculated for the Early Permian (295–275 Ma) with coordinates: $F = 45^\circ$ N, $L = 133^\circ$ E, $dp/dm = 18.2/19.0^\circ$. Thus, to clarify the Aerospace geological map and the history of geodynamic development of the Olkhon region, it is proposed to include a wide range of geophysical methods in the research.

Keywords: Western Baikal region, Siberian craton, Olkhon terrane, Central Asian folded belt, collisional suture, Aerospace geological map, petrophysical legend, physical-geological model

Funding. The research was conducted as part of student project at Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia) in 2024–2025.

For citation: Konstantinov K.M., Gachenko S.V., Konstantinov G.K., Konstantinov I.K., Lappo A.S., Pankevich V.A., et al. Physical and geological modeling of dolerite intrusion at collisional suture of Siberian craton – Olkhon terrane system (Western Baikal region). *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(2):?-?. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-2-6>. EDN: SIZYEB.

Введение

Коллизионный шов системы Сибирский кратон – Ольхонский террейн [1–5] является уникальным геологическим памятником для изучения разнообразных геодинамических процессов, связанных с движением литосферных плит Земли [6]. Шов прослежен от устья р. Бугульдейки на юго-западе до мыса Калтыгей на северо-востоке (рис. 1). Непрерывная протяженность шва на суше – 150 км, его ширина в плане – 1 км. Контрастно выражена линейная форма коллизионного шва заметна на аэро- и космических снимках любого масштаба. С зоной раннепалеозойского коллизионного шва пространственно совпадает молодой (кайнозойский) глубинный Приморский разлом Байкальской рифтовой зоны [7, 8].

Приморский разлом является крупнейшей неотектонической структурой и отчетливо проявляется в виде уступа рельефа вдоль западного побережья Байкала, а при геологическом картировании фиксируется мощной (300–800 м) зоной дробления. Длина разлома – около 200 км. Максимальная высота уступа в рельефе достигает 600 м. Основной сместитель разлома определяется как взброс с азимутом падения около $145\text{--}155^\circ$ и углом падения $65\text{--}70^\circ$ [9]. В кайнозойский период разлом развивался как правосторонний сбросо-сдвиг.

Не вызывает сомнения, что Ольхонский тектонический террейн был причленен к Сибирской платформе в каледонское время, поскольку вся гамма процессов воздействия на слагающие его породы глубинных флюидных



Рис. 1. Схема расположения изученных обнажений Ольхонского региона Западного Прибайкалья
Красными звездочками на карте обозначены обнажения с указанием номера; прямоугольник – участок работ
Fig. 1. Schematic map of the studied sites in the Olkhon area of the Western Baikal region
Red stars on the map indicate the sites with specified numbers; rectangle indicates work site

систем произошла в каледонское и позднекаледонское время в интервале 485–440 млн лет [10]. Следующий этап проявления тектоно-магматических процессов связан с развитием более молодой кайнозойской Байкальской рифтовой зоны [7, 8].

В строении коллизионного шва участвуют породы Сибирского кратона и Ольхонского террейна (рис. 2) [1, 5]. В первом преобладают очковые blastsмилониты по раннедокембрийским гранитам, во-втором отмечаются ультраблaстмилониты и очковые blastsмилониты. Для коллизионного шва характерна однообразная плоскостная текстура с падением на юго-восток под углами от 45 до 90°. На левом борту р. Анги можно наблюдать прижатый к жесткому кратону пакет тесно сжатых тектонических пластин с субвертикальной ориентировкой, которые несут признаки позднего коллизионного этапа.

В настоящее время в пределах участка Анга обнаружена пока единственная дайка базитов, прорывающая под косым углом сланцеватость blastsмилонитов коллизионного шва (см. рис. 2, а–с) [5]. Ее непрерывная протяженность в коренных выходах около 2 км с мощностью до 5 м. По геологическим данным дайка рассматривалась как синметаморфическая¹ (посторогенная) [11]. Полученный U-Pb-возраст по цирконам, выделенным из долеритов дайки, составил 289,6±4,4 млн лет

(ранняя пермь) [12]. Ранее дайки раннепермских долеритов (275±4 млн лет) были изучены в береговых обнажениях оз. Байкал на Шарыжалгайском выступе Сибирской платформы [13]. Кроме того, U-Th-Pb-результаты геохронологических (LA-ISP-MS) исследований детритовых цирконов из кайнозойских песчаных отложений о. Ольхон (бухта Сарайская) показали 286–310 млн лет [14]. Возможно, внедрение даек долеритов хорошо коррелируется с эпохой максимального сжатия (330–275 млн лет) южной активной окраины Сибирского палеоконтинента, в результате которой в Забайкалье (см. врезку на рис. 1) сформировался крупнейший Ангаро-Витимский гранитоидный батолит [15, 16]. Возможно, следы этих тектоно-магматических процессов отразились в виде векторов естественной остаточной намагниченности (ЕОН, $\bar{I}_n$) метакристаллической природы в Приольхонье [17].

Поскольку актуальность создания геологических карт нового поколения для Приольхонья с целью уточнения геологического строения коллизионного шва системы Сибирский кратон – Ольхонский террейн (участок Анга) не вызывает сомнения, поиск и изучение таких даек является одной из основных задач для осуществления проектной деятельности студентов Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия). Для решения данной задачи были проведены:

¹ Хромых С.В. Петрология магматических комплексов глубинных уровней коллизионных систем (на примере ранних каледонид Ольхонского региона Западного Прибайкалья): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.04. Новосибирск, 2006. 21 с.

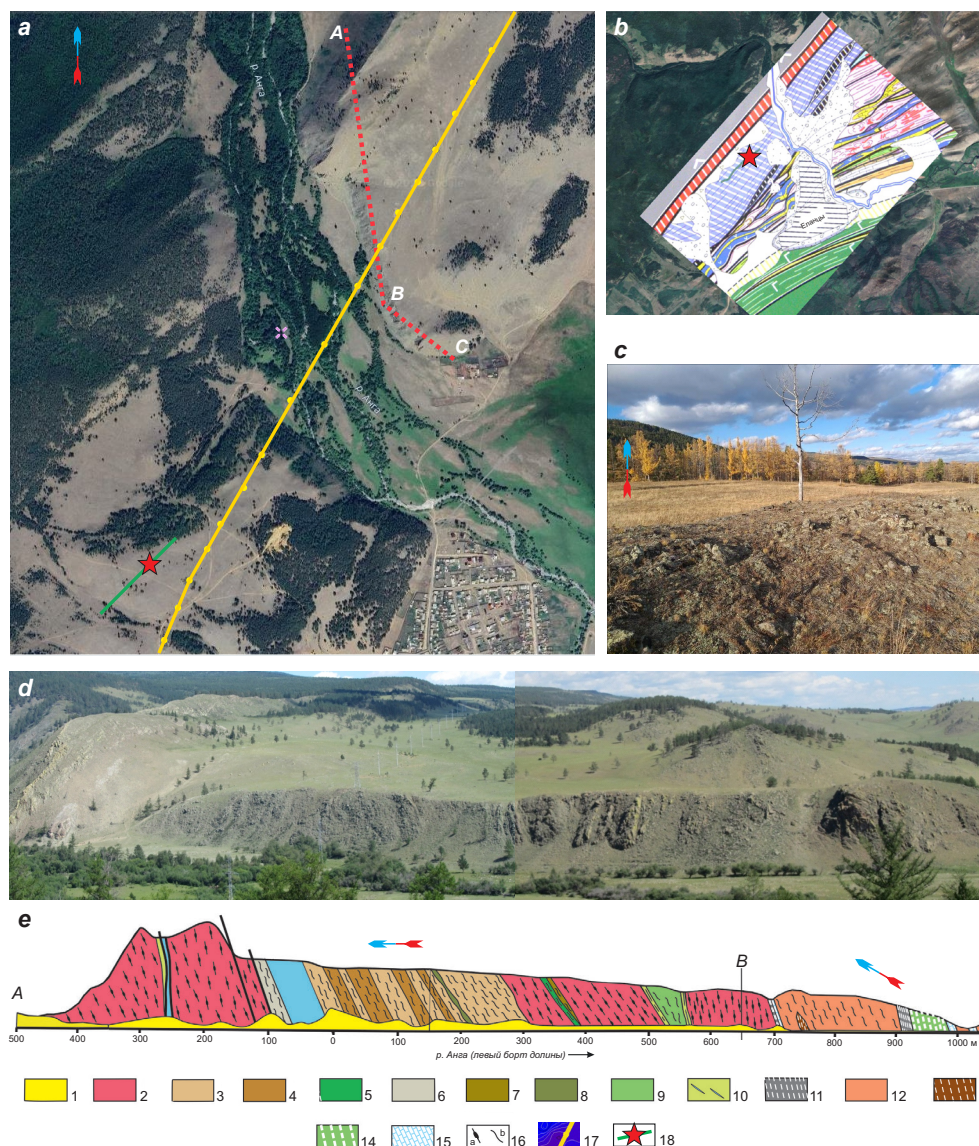


Рис. 2. Участок геофизических работ, река Анга:

a – схема участка; *b* – фрагмент геологической карты [2]; *c* – выход обнажения 24-60;

d – фотография обнажения 25-61; *e* – геологический разрез A-B-C обнажения 25-61 [5]:

- 1 – четвертичные образования; 2 – очковые мylonиты и бластомylonиты по гранитам приморского комплекса; 3 – тонкополосчатые мylonиты кварц-мусковит-хлоритовые; 4 – тонкополосчатые мylonиты мусковит-кварц-плагиоклазовые; 5 – амфиболиты; 6 – мусковит-кварц-калишпатовые бластомylonиты по мелкозернистым гранитам приморского комплекса; 7 – микрогнейсы с очковой текстурой; 8 – кварциты; 9 – сланцы эпидот-актинолит-плагиоклазовые по породам основного состава с линейной текстурой; 10 – эпидот-хлоритовые сланцы с линзами тонкозернистых кремненных мраморов; 11 – ультрамylonиты; 12 – мylonитизированные лейкократовые мелкозернистые граниты (ранний палеозой ?); 13 – мylonитизированные гнейсы; 14 – габбро-мylonиты с флазерной структурой; 15 – полосчатые тонкозернистые мраморные мylonиты; 16 – текстуры: *a* – очковые, *b* – сланцеватые; 17 – линии электропередач; 18 – обнажения 24/25-60

Fig. 2. Geophysical survey site, the Anga river:

a – site diagram; *b* – geological map fragment [2]; *c* – 24-60 site;

d – 25-61 site photo; *e* – A-B-C geological section of 25-61 site [5]

- 1 – Quaternary formations; 2 – speckled mylonites and blastomylonites from the granites of the Primorsky complex; 3 – finely banded quartz-muscovite-chlorite mylonites; 4 – finely banded muscovite-quartz-plagioclase mylonites; 5 – amphibolites; 6 – muscovite-quartz-potassium feldspar blastomylonites from the fine-grained granites of the Primorsky Complex; 7 – microgneisses with speckled texture; 8 – quartzites; 9 – epidote-actinolite-plagioclase schists in mafic rocks with a linear texture; 10 – epidote-chlorite schists with lenses of fine-grained silicified marbles; 11 – ultramylonites; 12 – mylonitized leucocratic fine-grained granites (Early Paleozoic?); 13 – mylonitized gneisses; 14 – gabbro-mylonites with a flaser structure; 15 – banded fine-grained marble mylonites; 16 – textures: *a* – speckled, *b* – schistose; 17 – power lines; 18 – 24/25-60 sites



– полевые работы по площадной магнитной съемке и отбору ориентированных образцов из коренных обнажений (см. рис. 2);

– лабораторные измерения физических свойств и их корректная статистическая обработка;

– геолого-геофизическая интерпретация материалов – трехмерное физико-геологическое моделирование в программе ModelVisionPro-17.5 (MVP-17.5, Encom Technology, Канада).

Основными объектами физико-геологического моделирования являются:

– постколлизийная дайка долеритов (290 млн лет) [5, 12];

– вмещающие ее бластомилониты коллизийного шва (500–470 млн лет) на северо-западе от пос. Еланцы (р. Анга) [1–5, 11].

Материалы и методы исследования

Первые геохронологические, петро- и палеомагнитные результаты, полученные по дайке долеритов участка Анга [12, 18], вошли в противоречие с геологическими представлениями [5, 11]. Во-первых, количество выделенных из нее разновозрастных цирконов (более 90 кристаллов) не соответствует размерам рассматриваемого интрузивного тела – дайка мощностью до 5 м. Во-вторых, анизотропия магнитной восприимчивости долеритов не соответствует «дачному» геотипу [19]: плоскость магнитного расслоения сечет простирание дайки примерно под прямым углом (табл. 1, рис. 3, а). То же самое установлено и для бластомилонитов из экзоконтакта дайки долеритов (см. табл. 1, рис. 3, б). В то

же время для коллизийного шва плоскость магнитного расслоения согласуется с его северо-восточным простиранием (см. табл. 1, рис. 3, с). В-третьих, тест обжига является отрицательным²: достаточно широкая (более 15 м) зона перемагничивания вмещающих дайку бластомилонитов (табл. 2, рис. 4) свидетельствует о метакристаллической (наложенной, постмагматической) ЕОН на обнажениях 24-60 и 25-60, что в сочетании с анизотропией магнитной восприимчивости указывает на ее динамическую природу. Тем более виртуальный геомагнитный полюс³ в современной системе координат имеет высокоширотное положение $F = 81^\circ$ с. ш., $L = 348^\circ$ в. д., $dp/dm = 13,2/16,2^\circ$, а палеоширота $fm = 48^\circ$ близка к географическому положению района исследований. Виртуальный геомагнитный полюс явно не соответствует раннепермскому палеомагнитному полюсу³ [13] внедрения дайки. Это может объясняться либо магнитным экскурсом³ (палеомагнитная аномалия), либо сдвигом по сместителю Приморского листрического разлома. Не исключен и молодой возраст дайки долеритов, соответствующий времени заложения Байкальской рифтовой зоны.

Такое поведение магнитных характеристик на изученных обнажениях 24-60 и 25-60 может объясняться двумя вариантами:

1. Блок горных пород избирательно подвергся сильному давлению в постпермское время. Этот вариант не объясняет наличие большого числа кристаллов циркона в дайке, характеризующих основные геологические события в регионе. В то же время долериты, хотя и претерпели низкотемпературные метаморфические изменения, но без текстурных

Таблица 1. Параметры анизотропии магнитной восприимчивости петрофизических таксонов участка реки Анга

Table 1. Anisotropy parameters of the Anga river section petrophysical taxa magnetic susceptibility

Номер обна- жения	N	Параметры анизотропии магнитной восприимчивости				Полуоси эллипсоида анизотропии магнитной восприимчивости														
						Максимальная, K1					Средняя, K2					Минимальная, K3				
		L	F	Pj	T	K1	D, °	J, °	α1	α2	K2	D, °	J, °	α1	α2	K3	D, °	J, °	α1	α2
24-60	14	1,02	1,022	1,043	0,047	1,021	313,6	5,6	15,8	10,5	1,001	202,7	74,7	32,1	12,5	0,979	45,1	14,2	32	6,8
25-60	13	1,082	1,081	1,169	-0,007	1,079	289,5	54,8	30,3	14,1	0,998	163,4	22,5	36	26,6	0,923	62	25,5	34,5	16
25-61	44	1,038	1,046	1,086	0,087	1,04	63,3	3,7	37,2	26,6	1,002	186,5	83,2	36,5	32,1	0,958	333	5,7	34,6	25,6

Примечание. N – количество образцов. L/F – линейная/плоскостная анизотропия; Pj – степень анизотропии; T – параметр формы; D/J – склонение/наклонение; $\alpha 1/\alpha 2$ – полуоси овала доверия.

² 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.

³ Печерский Д.М., Соколов Д.Д. Палеомагнитология, петромагнитология и геология: словарь-справочник для соседей по специальности. М.: Изд-во ИФЗ, 2010.

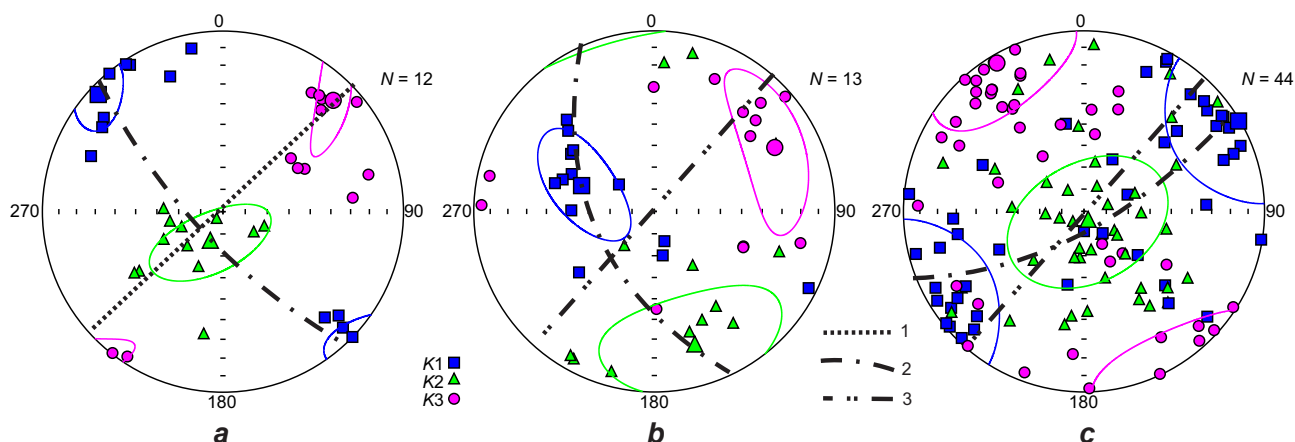


Рис. 3. Магнито-текстурные исследования:

а – долериты, обнажение 24-60; б – бластомилониты из экзоконтакта, обнажение 25-60;
с – бластомилониты, обнажение 25-61

K1, K2, K3 – оси эллипсоида анизотропии магнитной восприимчивости
максимальная, средняя и минимальная соответственно

1 – азимут простирания дайки; 2 – плоскость магнитного расслоения;

3 – азимут простирания бластомилонитов

Fig. 3. Magnetic-textural studies:

a – dolerites, 24-60 site; b – blastomylonites from the exocontact, 25-60 site;
c – blastomylonites, 25-61 site

K1, K2, K3 – axes of magnetic susceptibility anisotropy ellipsoid
major, medium and minor respectively

1 – dike strike azimuth; 2 – magnetic stratification plane; 3 – blastomylonite strike azimuth

Таблица 2. Результаты палеомагнитных исследований петрофизических таксонов участка реки Анги
Table 2. Results of paleomagnetic studies of the Anga river section petrophysical taxa

Тип породы, номер обнажения	N	Палеомагнитные направления				Палеомагнитный полюс				fm, °
		D, °	J, °	k	α_{95} , °	F, °	L, °	dp, °	dm, °	
Долериты, обнажение 24-60	14 s	168,3	-69,2	14,4	10,8	–	–	–	–	–
Бластомилониты, обнажение 25-60	5 s	168,9	-56,6	8,85	27,2	–	–	–	–	–
Сводное: ССК(g) ДСК(t)	19 s	$\frac{168,5}{284}$	$\frac{-66}{-80}$	12,53	9,9	$\frac{81,4}{45}$	$\frac{348,3}{133}$	$\frac{13,2}{18,2}$	$\frac{16,2}{19}$	$\frac{48}{71}$
Дайки долеритов Шарыжалгайского выступа [13]	5 S	270	-84,5	22,1	16,7	50,6	121,4	16,7	17	79
Минглинг-дайки Приольхонья [17]	21 s	158,2	-75,6	18	7,7	52	150	12,8	14,1	63

Примечание. N – количество образцов s / сайтов S, участвующих в статистике. D – склонение; J – наклонение; k – кучность; α_{95} – овал доверия с вероятностью 95 %. F – широта; L – долгота; dp/dm – полуоси овала доверия; fm – палеоширота. ССК/ДСК – современная (g – географическая) / древняя (t – тектоническая поправка) система координат. Пояснения см. в тексте.

преобразований. Для них характерна типичная офитовая структура: идиоморфные лейсты плагиоклаза и ксеноморфные выделения пироксена [18].

2. Выход долеритов на дневную поверхность является частью более мощного слепого интрузивного тела, значительная часть которого (как у айсберга) погребена во вме-

щающих горных породах. Этот вариант является более логичным. Для его доказательства необходима постановка геофизических методов, прежде всего магниторазведки и сопутствующего ей изучения магнитных свойств петрофизических таксонов, для формирования петрофизической и физико-геологической моделей.

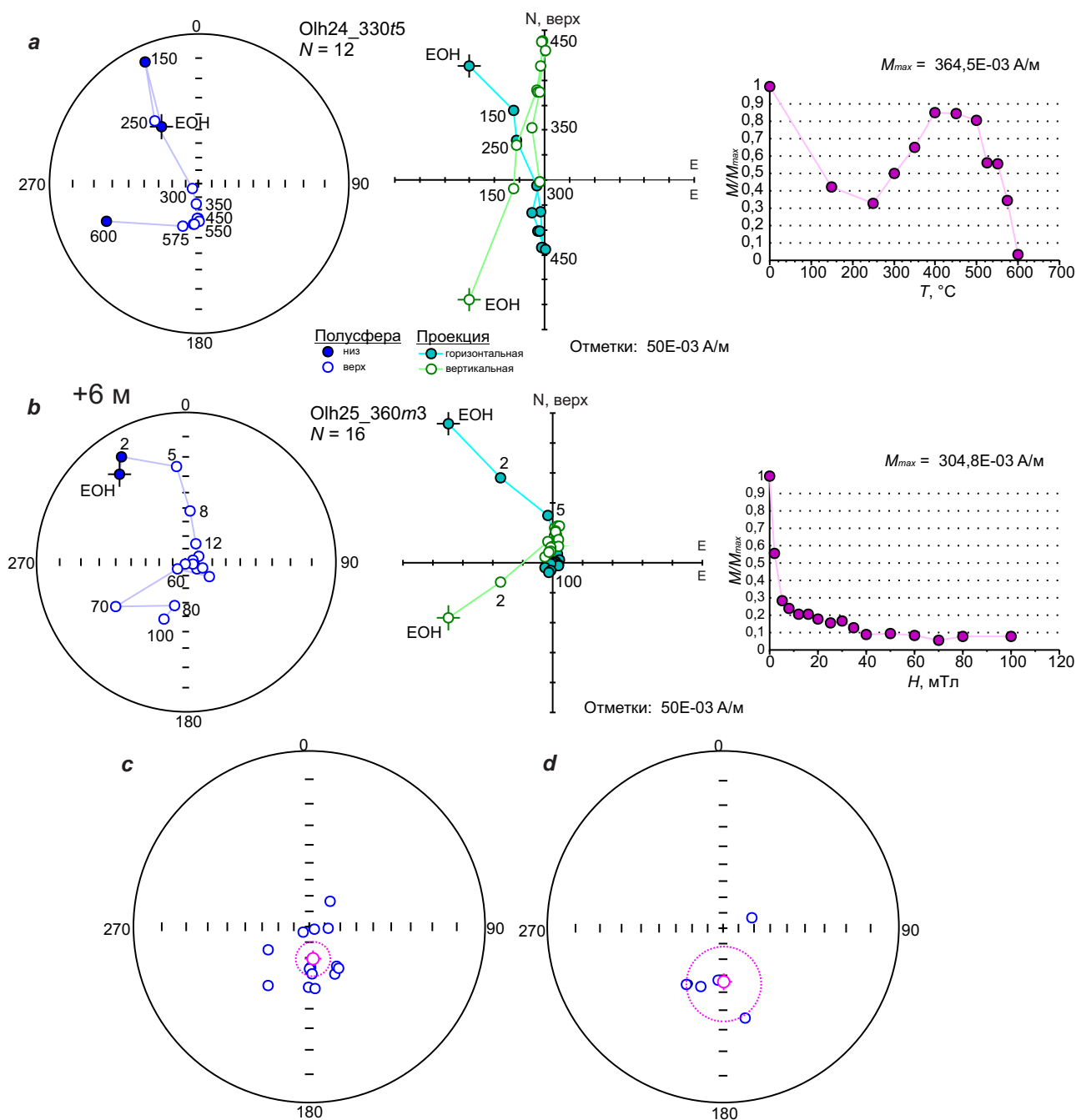


Рис. 4. Результаты лабораторных палеомагнитных исследований:

a – долериты, обнажение 24-60; b – бластомилониты, обнажение 25-60;

c – направление характеристических векторов естественной остаточной намагниченности долеритов, обнажение 24-60; d – направление характеристических векторов естественной остаточной намагниченности бластомилонитов из экзоконтакта, обнажение 25-60

Fig. 4. Results of laboratory paleomagnetic studies:

a – dolerites, 24-60 site; b – blastomylonites, 25-60 site; c – direction of characteristic vectors of natural remanent magnetization of dolerites, 24-60 site; d – direction of characteristic vectors of natural remanent magnetization of blastomylonites from the exocontact, 25-60 site

Методика комплексных исследований на участке Анга с целью формирования физико-геологической модели предусматривала:

1. Проведение наземной магнитной съемки с целью поисков даек долеритов по стандартной методике⁴ с использованием высо-

⁴ Инструкция по магниторазведке (наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка). Л.: Недра, 1981. 263 с.



коточного магнитометра ММПОС-1/2 (Физико-технологический институт Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия), работа которого основана на эффекте Оверхаузера (резкое усиление сигнала ядерного магнитного резонанса при насыщении электронного парамагнитного резонанса или взаимодействии спинов разных ядер). На стадии подготовки выполнялись проектирование сети наблюдений, поверка и эталонирование аппаратуры, организация пунктов учета вариаций геомагнитного поля. В процессе полевых измерений осуществляются регистрация модуля полного вектора магнитной индукции по профилям или маршрутам с заданной частотой, синхронная запись вариаций на опорной точке.

Полученные данные были обработаны в программе Surfer, в которой проведены интерполяция и построение карты магнитного поля участка. На начальном этапе обработки осуществлена минимизация влияния линий электропередач на результаты съемки путем контроля параметров QMC (погрешность съемки, *от англ.*: Quality Measured Computed) и ST (точность прибора, *от англ.*: Smart Tweezers). Для визуализации общего распределения магнит-

ного поля построена карта изолиний магнитного поля (рис. 5). С целью выделения областей спокойного и возмущенного поля выполнены трансформации магнитного поля: рассчитаны исходное и сглаженное региональное поля, после чего путем вычитания получена карта локальных аномалий магнитного поля. Для детализации строения приразломной зоны построены план графиков магнитного поля и план градиентов магнитного поля, на основе которых проведен линеаментный анализ.

2. Отбор ориентированных образцов (штуфов) из коренных обнажений горных пород (см. рис. 2) по общепринятой методике² в современной системе координат.

3. Пробоподготовку – изготовление из каждого штуфа 3–4 кубиков с ребром 20 мм, что в общей сложности составило около 105 кубиков.

4. Первичные измерения объемной плотности σ , магнитной восприимчивости α и векторов ЕОН.

Проводились петрофизические исследования⁵, характеризующие гравитационное и магнитное состояние горных пород *in situ*. На данном этапе исследований велось изучение объемной плотности σ , векторов ЕОН $\vec{I}_n$, ин-

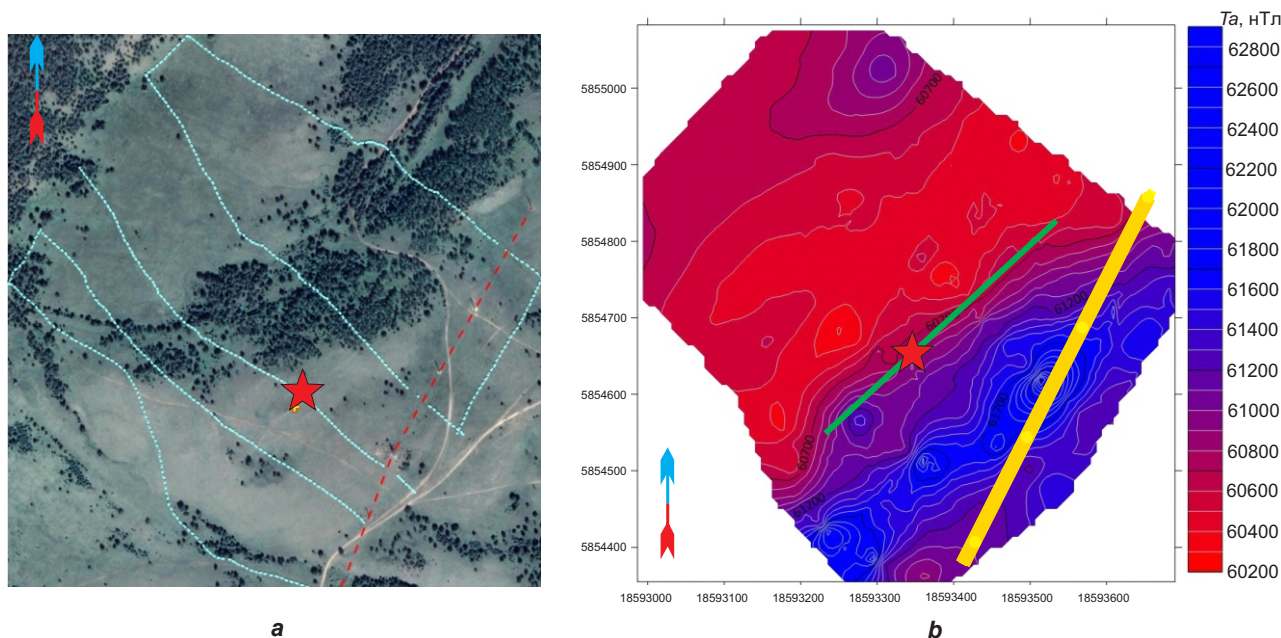


Рис. 5. Результаты наземной магнитной съемки участка Анга:

a – положение профилей (точечная линия), линии электропередач (пунктирная линия) и изученных обнажений 24-60 и 25-60 (звездочка); *b* – карта полного вектора магнитного поля

Fig. 5. Results of ground magnetic survey of the Anga river section:

a – position of profiles (dotted line), power lines (dashed line), and 24-60 and 25-60 studied sites (asterisk); *b* – map of the full magnetic field vector

⁵ Петрофизика: справочник. В 3 кн. Кн. 2. Техника и методика исследований / под ред. А.А. Молчанова, Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1992. 256 с.



дуктивной $\vec{I}i = \alpha \vec{T}$ (где $\vec{T}$ – вектор напряженности магнитного поля Земли в районе работ) и суммарной $\vec{I}s = \vec{I}n + \vec{I}i$ намагниченностей, от которых зависит тип наблюдаемого (аномального и локального) магнитного поля. В свою очередь, векторы намагниченности ($\vec{I}n$, $\vec{I}i$ или $\vec{I}s$) определяются в пространстве тремя составляющими: величиной (соответственно I_n , I_i и I_s), склонением ($0 < D < 360^\circ$) и наклонением ($-90^\circ < J < 90^\circ$). Отношение I_n/I_i характеризует коэффициент Кёнигсбергера (фактор Q).

Вышеперечисленные исследования проведены на современной аппаратуре и оборудовании: измерителях магнитной восприимчивости α (KLY-3s и MFK1-FA, AGICO, Чехия) и спин-магнитометрах для измерения векторов ЕОН (JR-6, AGICO, Чехия). Для представления графической и аналитической фактографии при проведении петромагнитных исследований использовались компьютерные программы Statistica-6 [20] и PetroStat [21].

5. Физико-геологическое моделирование. Для решения поставленной задачи использована программа MVP-17.5. Она позволяет строить геологические модели и сравнивать их имитированные характеристики с данными полевых наблюдений. Данная программа также автоматизирует процесс прямого моделирования, что позволяет проверить решение о пригодности той или иной физико-геологической модели и предсказать некоторые свойства объектов. Программа представляет собой трехмерную оболочку, которую можно использовать для создания простых геологических моделей, с высоким уровнем исполнения или комплексных моделей с большим количеством объектов. Каждая модель состоит из одного или нескольких твердых объектов (сфера, призма, цилиндр и др.), заглубленных в однородной среде. В свою очередь, каждый объект обладает неизменными физическими свойствами, но в результате комбинации многих объектов могут сформироваться комплексные модели подземной обстановки. В процессе моделирования с помощью программы MVP-17.5, всегда создаются трехмерные объекты (петрофизические модели). Одним из достоинств моделирования в MVP-17.5 является возможность оперировать не только скалярными (магнитная восприимчивость, фактор Q , величина ЕОН), но и векторными магнитными параметрами, характеризующимися, кроме величины I , склонением D и наклонением J . Программа позволяет работать в интерактивном режиме

одновременно с гравитационным и магнитными полями, что в сочетании с соответствующими объемными изображениями (перспектива), картами и разрезами, а также другими геологическими материалами помогает извлечь существенную информацию о свойствах интересующего нас объекта. Файлы сеанса работы вмещают в себя все данные, модели и их отображения и полезны в качестве средства быстрого возврата к той же самой рабочей директории при следующем сеансе работы с программой MVP-17.5. Это позволяет корректировать старые и вносить новые параметры и тем самым постоянно совершенствовать физико-геологическую модель объектов исследований.

Результаты исследования и их обсуждение

Выполненные в процессе пешеходной съемки измерения (см. рис. 5, а) позволили построить карту магнитного поля (см. рис. 5, б). Интенсивность наблюдаемого поля варьируется от 60200 до 62800 нТл. На юго-востоке участка Анга прослеживается положительная магнитная аномалия северо-восточного простирания. Изученное интрузивное тело долеритов находится на северо-западном фланге аномалии (в градиентной зоне). Других магнитных аномалий, связанных с постколлизийными дайками в пределах развития бластомилолитов коллизийного шва, на участке Анга не установлено.

Результаты статистической обработки данных петрофизических исследований на участке Анга приведены в табл. 3. Долериты из дайки (объемная плотность $\sigma = 3042,2 \pm 8,2$ кг/м³) характеризуются относительно повышенными значениями магнитных параметров: $\alpha = 2834 \times 10^{-5}$ СИ, $I_i = 1375 \times 10^{-3}$ А/м, $I_n = 792 \times 10^{-3}$ А/м, фактор $Q = 0,58$ ед. Наклонение вектора ЕОН отрицательное: $J_n = -25^\circ$. Бластомилолиты из экзоконта дайки имеют повышенные значения $I_n = 145 \times 10^{-3}$ А/м, фактор $Q = 0,45$ ед. и пониженную $\alpha = 368 \times 10^{-5}$ СИ по сравнению с бластомилолитами на значительном удалении: $I_n = 65 \times 10^{-3}$ А/м, фактор $Q = 0,29$ ед. и $\alpha = 435 \times 10^{-5}$ СИ. По этим показателям очевидно, что бластомилолиты на контакте испытывали температурное воздействие со стороны долеритов (ороговикование). Полученными данными о современной намагниченности долеритов были учтены при построении физико-геологической модели для разных вариантов.



Таблица 3. Дескриптивные значения физических параметров петромагнитных таксонов участка реки Анги *in situ*

Table 3. Descriptive values of physical parameters of the Anga river section petrophysical taxa *in situ*

Тип породы, номер обнажения	<i>n</i>	Магнитная восприимчивость, 10^{-5} СИ		Индуктивная намагниченность, 10^{-3} А/м		Естественная остаточная намагниченность, 10^{-3} А/м						Коэффициент Кёнигсбергера, ед.	
		χ	ϵ	I_i	ϵ	I_n	ϵ	$D, ^\circ$	$J, ^\circ$	k , ед.	$\alpha_{95}, ^\circ$	Q	ϵ
Долериты, обнажение 24-60	16	2834	1,1	1375	1,1	792	1,11	356	-25	2,71	28,02	0,58	1,09
Бластомилониты из экзоконтакта, обнажение 25-60	28	368	1,27	324	1,27	145	1,2	273	33	5,62	12,65	0,45	1,13
Бластомилониты на левом борту реки Анги, обнажение 25-61	61	435	1,24	225	1,24	65	1,32	348	45	2,47	14,94	0,29	1,11

Примечание. *n* – количество кубиков; ϵ – стандартный множитель; k – кучность; α_{95} – радиус овала доверия с вероятностью 95 %. D/J – склонение/наклонение. Другие пояснения см. в тексте.

В первом варианте мы проверили гипотезу геологов, которые рассматривали внедрение долеритов в форме дайки мощностью до 5 м. Решая прямую задачу геофизики [22], мы аппроксимировали дайку долеритов вертикальной пластиной (рис. 6, а). Однако модельная аномалия явно не вписывается в график наблюдаемого магнитного поля, а ошибка RMS (от англ.: Root Mean Square) превышает 25. Согласно прямому моделированию стало очевидно, что наблюдаемое магнитное поле могут создавать более мощные два и более тела долеритов (рис. 6, б). При таком варианте расхождение (ошибка) наблюдаемого и модельного полей уменьшилось.

На следующем этапе физико-геологического моделирования мы запустили автоматическую инверсию с учетом трех интрузивных тел, разных по мощности и глубине залегания. При этом значения магнитных параметров были зафиксированы, а изменялись только значения геометрических параметров (рис. 7, а). В итоге ошибка RMS уменьшилась до 4,8. Поскольку тела характеризовались одними и теми же магнитными значениями, мы объединили их в один объект, аппроксимировав его более сложным телом – полигоном (рис. 7, б). И даже в этом варианте ошибка RMS практически осталась на том же уровне.

На данном этапе исследований построенная физико-геологическая модель силла долеритов большой мощности (см. рис. 7, б) верхней части разреза участка Анга объясняет:

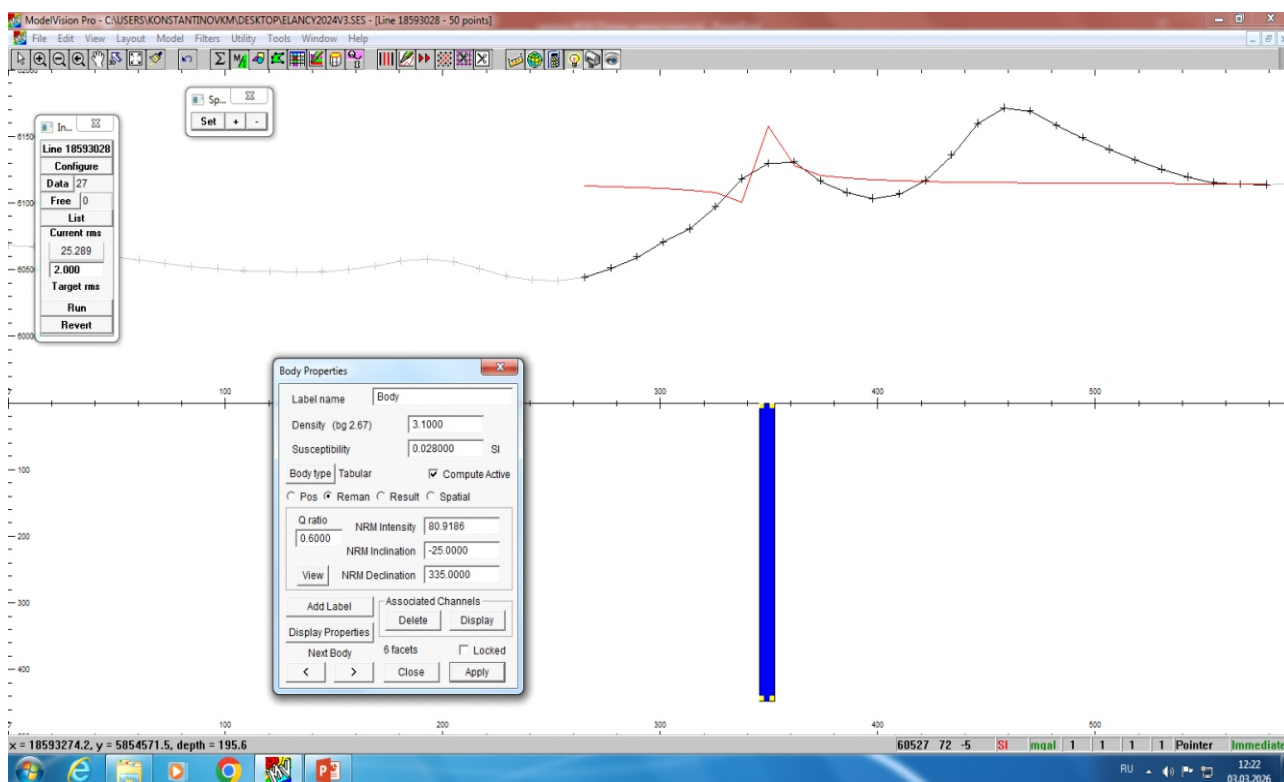
1. Высокое содержание (96 кристаллов) разновозрастных цирконов, геохронология ко-

торых коррелируется с основными геологическими эпохами геодинамической истории развития Приольхонья [12, 14, 23].

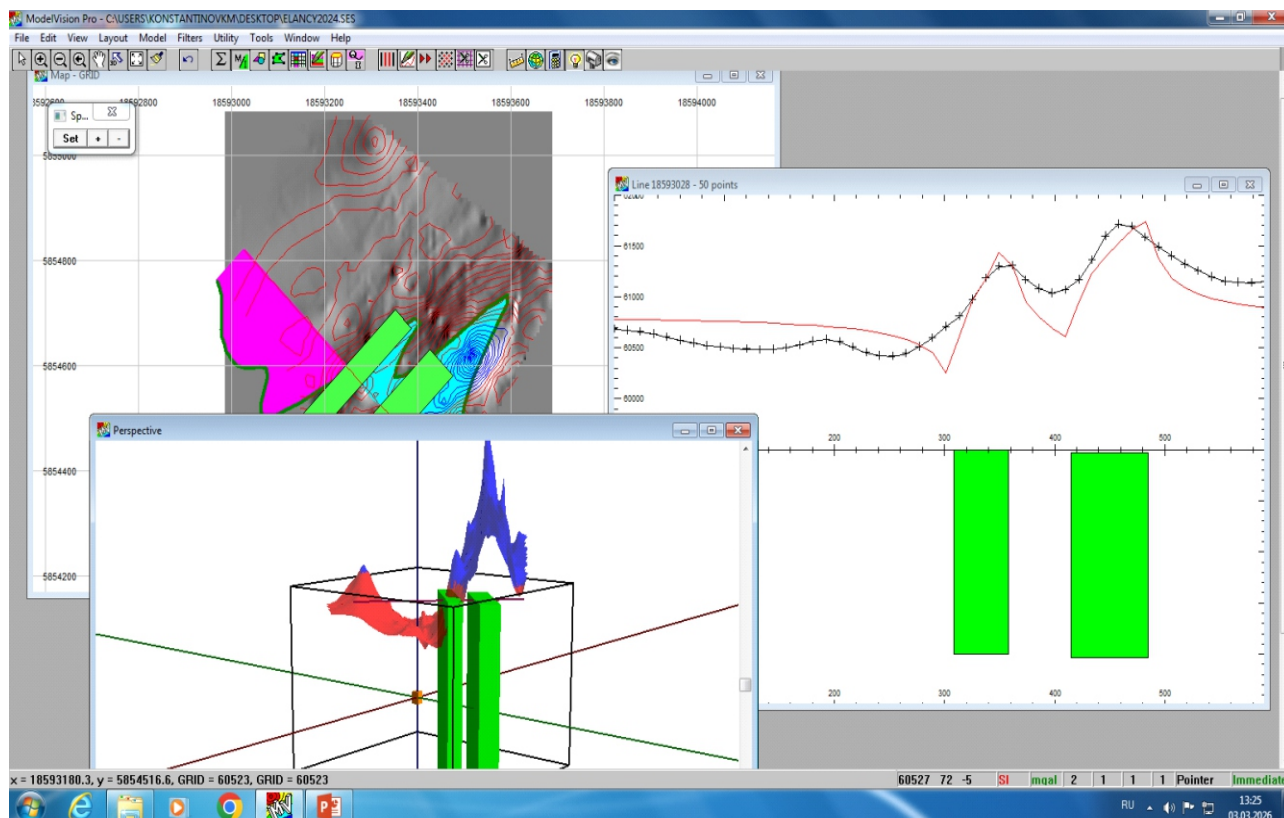
2. Характер поведения анизотропии магнитной восприимчивости долеритов (обнажение 24-60), которая не соответствует «даечному» геотипу (см. рис. 3, а). Такое поведение плоскости магнитного расслоения (оси K_1 и K_2) вполне соответствует телу большой мощности, в котором протекали процессы дифференциации магмы. Кроме того, становится понятным и поведение анизотропии магнитной восприимчивости бластомилонитов из экзоконтакта (обнажение 25-60). Ее отличие (см. рис. 3, б) от бластомилонитов (см. рис. 3, с) долины р. Анги (обнажение 25-61) может объясняться давлением со стороны тела долеритов (петромагнитные неоднородности стресса) [19].

3. Отрицательный тест обжига, согласно которому в долеритах и в их экзоконтакте (вмещающие бластомилониты) образовалась метакристаллическая ЕОН динамической (пьеостаточной) природы (см. рис. 4). Если принять вариант геологов, то причиной ее появления могли послужить постмагматические (например, неотектоника) процессы при формировании Байкальской рифтовой зоны [7, 8]. Однако, с другой стороны, для бластомилонитов левого борта р. Анги в обнажении 25-61 (см. рис. 2) такой закономерности в векторах характеристической ЕОН не установлено [12, 18].

Для физико-геологической модели силла выстраивается совершенно противоположная картина: в долеритах на момент его становления образовались первичные векторы ЕОН термоостаточной природы, в то время как бластомилониты в экзоконтакте были пере-

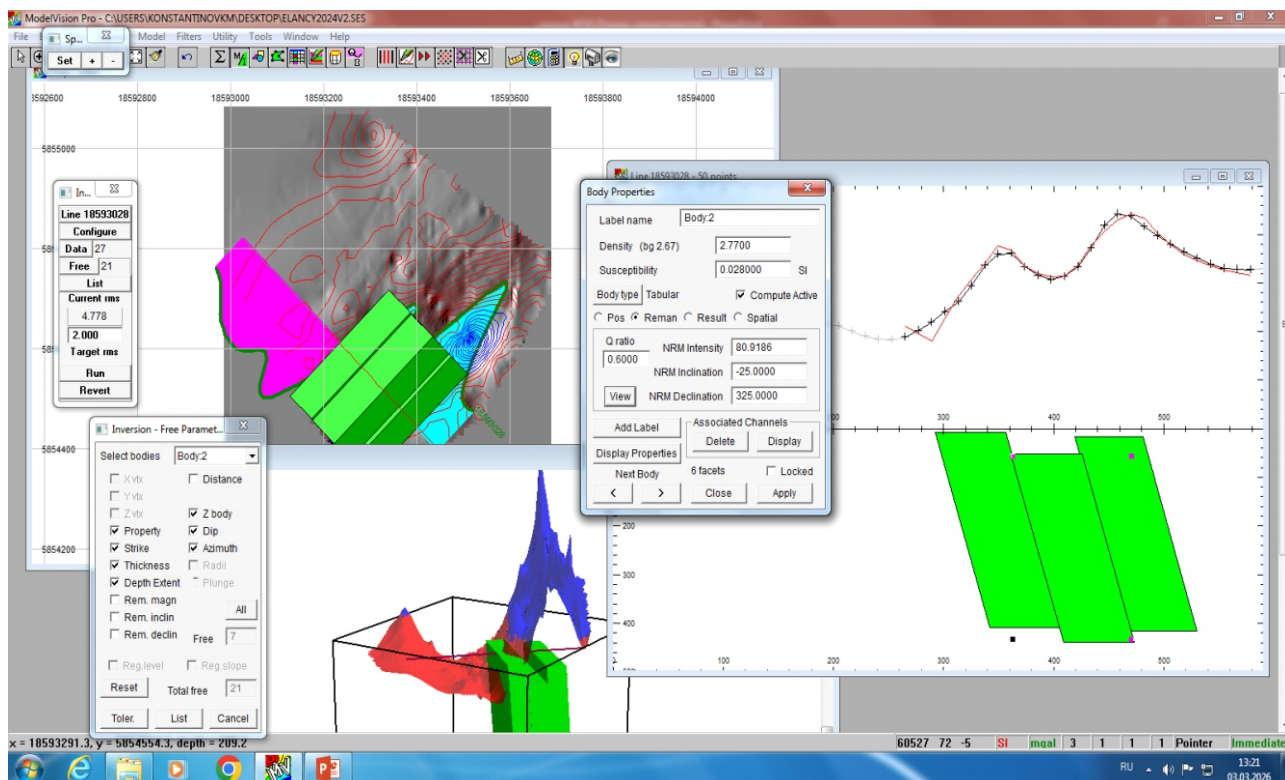


a

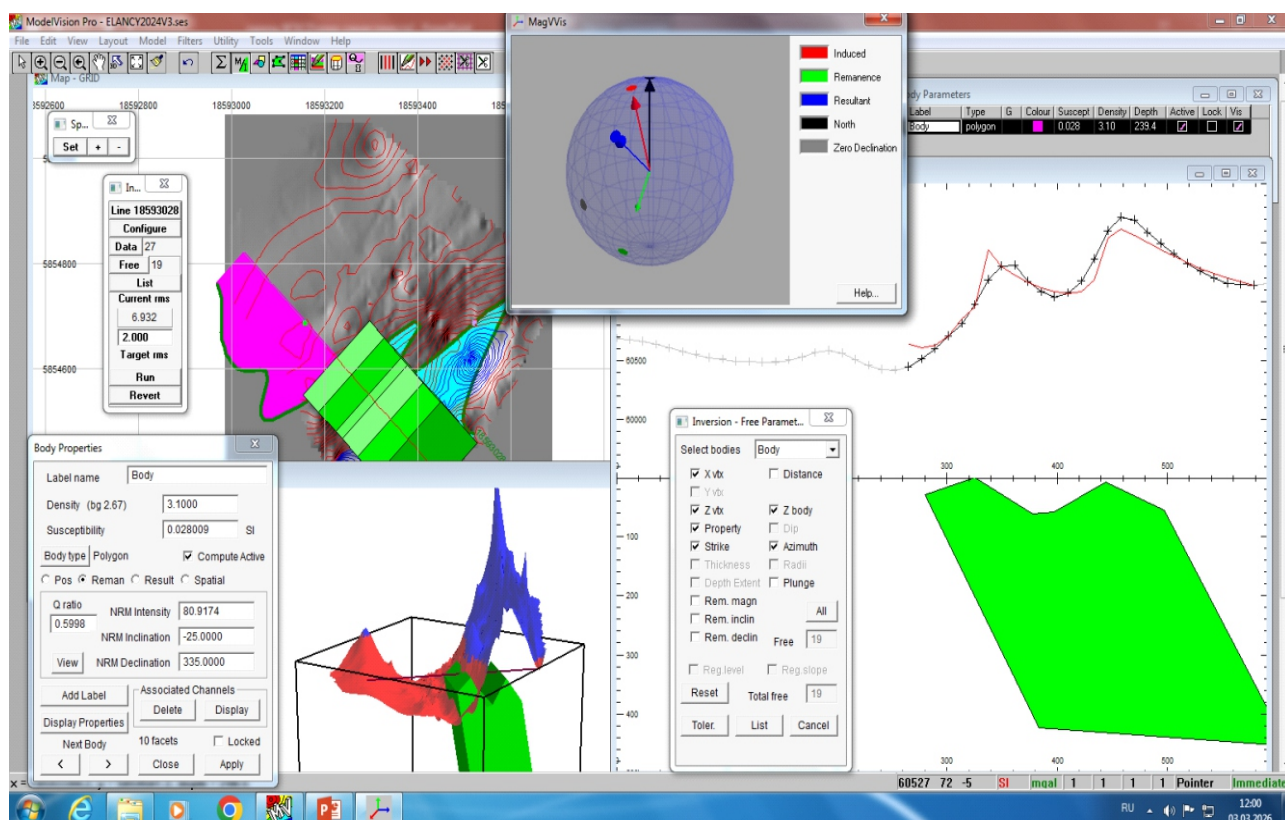


b

Рис. 6. Скриншот решения прямой задачи в программе MVP-17.5:
a – магнитная аномалия от дайки долеритов согласно источнику [5];
b – физико-геологическое моделирование для двух интрузивных тел
Fig. 6. Screenshot of the direct problem solution in MVP-17.5 program:
a – magnetic anomaly from dolerite dike, according to source [5];
b – physical and geological modeling for two intrusive bodies



a



b

Рис. 7. Скриншот решения обратной задачи (инверсия) в программе MVP-17.5:

a – физико-геологическое моделирование для трех интрузивных тел;

b – физико-геологическое моделирование для интрузивного тела сложной формы (полигон)

Fig. 7. Screenshot of the inverse problem solution in MVP-17.5 program:

a – physical and geological modeling for three intrusive bodies;

b – physical and geological modeling for an intrusive body of complex shape (polygon)



магничены за счет температуры и давления на более значительном расстоянии от контакта интрузивного тела. В этом случае динамическое воздействие Байкальской рифтовой зоны на векторы ЕОН долеритов (обнажение 24-60) и бластомилонитов (обнажение 25-60) исключается. Тогда, следуя логике, в направления характеристической ЕОН пород обнажений 24-60 и 25-60 следует ввести тектоническую поправку за наклон сместителя Приморского разлома (см. выше), из-за которого блок мог испытать вращение в пространстве (см. табл. 2). При пересчете из современной системы координат в древнюю положение виртуального геомагнитного полюса пород обнажений 24-60 и 25-60 согласуется с раннепермским палеомагнитным полюсом по дайкам Шарыжалгайского выступа Сибирской платформы [13] и виртуальным геомагнитным полюсом, рассчитанным по метакхронной намагниченности базитовых даек Приольхонья [17] (рис. 8).

Заключение

Физико-геологическое моделирование, выполненное на основе петромагнитных данных, показало, что изученные на участке Анга долериты слагают более мощное интрузивное тело (силл), чем закартированная геологами дайка [5]. Согласно предложенной физико-геологической модели, метаморфические образования коллизионного шва системы Сибирский кратон – Ольхонский террейн в ранней перми (300–275 млн лет) были прорваны силлом долеритов мощностью ≈ 200 м. Вероятнее всего, это событие связано с активными тектоно-магматическими процессами, проявившимися вдоль южной горно-складчатой окраины Сибирского палеоконтинента, в результате которых в Забайкалье (см. врезку на рис. 1) сформировался крупнейший Ангаро-Витимский гранитоидный батолит [15, 16]. Для уточнения Аэрокосмической геологической карты [2] и истории геодинамического

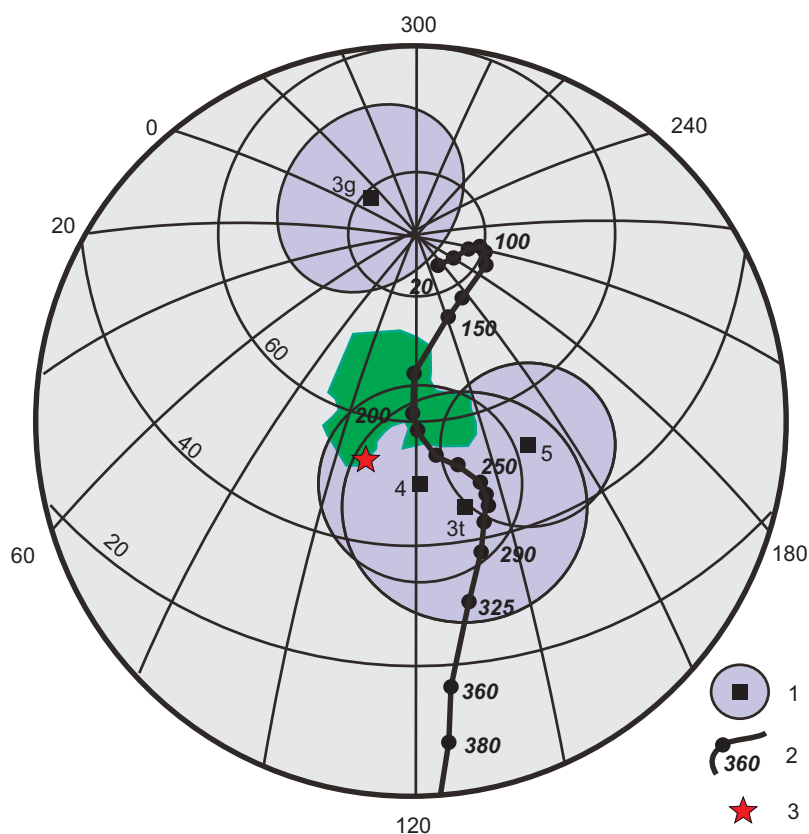


Рис. 8. Иллюстрация к интерпретации палеомагнитных данных:

1 – виртуальные геомагнитные полюса (номера соответствуют табл. 2);
2 – траектория кажущейся миграции полюса⁶, цифры – возраст, млн лет; 3 – район работ

Fig. 8. Illustration of paleomagnetic data interpretation:

1 – virtual geomagnetic poles (numbers correspond to Table 2);
2 – apparent polar wander path⁶, numbers indicate age in Ma; 3 – work area

⁶ Павлов В.Э. Палеомагнетизм Сибирской платформы: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 25.00.10. М., 2015. 47 с.



развития Приольхонья [23] геофизические исследования необходимо продолжать.

Важно отметить, что амплитуда, характер и размер магнитных аномалий (см. рис. 5–7) допускают эффективное обнаружение и картирование перспективных обстановок с помощью детальной аэромагнитной съемки, которую целесообразно проводить в вари-

анте с применением беспилотного летательного аппарата в более крупных масштабах [24, 25]. В перспективе с ней желательно сочетать гравитационную, сейсмическую и другие методы геофизических съемок, что позволит проводить физико-геологическое моделирование с максимальной достоверностью.

Список источников

1. Федоровский В.С., Лихачев А.Б., Риле Г.В. Зона столкновения типа «террейн-континент» в Западном Прибайкалье: структура коллизионного шва // Тектоника Азии / отв. ред. Ю.В. Карякин. М.: ГЕОС, 1997. С. 228–232.
2. Федоровский В.С., Складов Е.В., Гладкохуб Д.П., Мазукабзов А.М., Донская Т.В., Лавренчук А.В. [и др.]. Коллизионная 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: YVJJH.
3. Федоровский В.С., Складов Е.В. Ольхонский геодинамический полигон (Байкал): аэрокосмические данные высокого разрешения и геологические карты нового поколения // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 4. С. 331–418. EDN: NTLDVH.
4. 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: north-eastern segment: guidebook and abstract volume of the Siberian Workshop IGCP-480 / ed. E.V. Sklyarov. Irkutsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2005. P. 5–76. EDN: QKFEIB.
5. 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): материалы науч. совещ. (г. Иркутск, 17–20 октября 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2017. Вып. 15. С. 174–175. EDN: ZVPSLT.
6. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Научный мир, 2001. 606 с.:
7. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 5. С. 391–406. EDN: MMWIPW.
8. Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины. Строение и геологическая история. Новосибирск: Гео, 2001. 249 с.
9. Лунина О.В., Гладков А.С., Черемных А.В. Разрывная структура и трещиноватость зоны Приморского разлома (Байкальская рифтовая система) // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 5. С. 446–455. EDN: UZWRLY.
10. Летников Ф.А., Савельева В.Б. Проявление процессов эндогенной флюидизации земной коры в Приольхонье // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): материалы науч. совещ. (г. Иркутск, 16–20 октября 2006 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2006. Вып. 4. С. 212–216.
11. Sklyarov E.V., Fedorovskii V.S., Gladkochub D.P., Vladimirov A.G. Synmetamorphic basic dikes as indicators of collision structure collapse in the Western Baikal region // Doklady Earth Sciences. 2001. Vol. 381A. P. 1028–1033. EDN: LGPNEZ.
12. Константинов К.М., Складов Е.В., Чжан Х., Косарева Л.Р., Константинов И.К., Константинов Г.К. [и др.]. Петро- и палеомагнетизм дайки долеритов коллизионного шва системы Сибирский кратон – Ольхонский террейн (пос. Еланцы, Западное Прибайкалье) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): материалы науч. совещ. (г. Иркутск, 14–18 октября 2025 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2025. Вып. 23. С. 133–135.
13. Pisarevsky S.A., Gladkochub D.P., Donskaya T.A., De Waele B., Mazukabzov A.M. Palaeomagnetism and geochronology of mafic dykes in south Siberia, Russia: the first precisely dated Early Permian palaeomagnetic pole from the Siberian craton // Geophysical Journal International. 2006. Vol. 167. Iss. 2. P. 649–658. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03160.x>.
14. Котов А.Б., Ковач В.П., Сковитина Т.М., Лопатин Д.В., Донская Т.В., Складов Е.В. [и др.]. Источники кайнозойских песчаных отложений острова Ольхон (Байкальская рифтовая зона): результаты U-Th-Pb геохронологических (LA-ISP-MS) исследований // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): материалы науч. совещ. (г. Иркутск, 17–20 октября 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2017. Вып. 15. С. 145–146. EDN: ZVOYNR.
15. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Козловский А.М. [и др.]. Позднепалеозойская–раннемезозойская рифтовая система Центральной Азии: состав и источники магматизма, закономерности формирования и геодинамика // Проблемы тектоники Центральной Азии: сборник науч. статей / отв. ред. М.Г. Леонов. М.: ГЕОС, 2005. С. 197–236. EDN: QKIZFF.
16. Цыганков А.А., Матуков Д.И., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Посохов В.Ф., Цыренов Б.Ц. [и др.]. Источник магм и этапы становления позднепалеозойских гранитоидов Западного Забайкалья // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 1. С. 156–180. EDN: HYIWBH.



17. 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 науч. совещ. (г. Иркутск, 16-20 октября 2006 г.). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2006. Вып. 4. С. 171–174.
18. Константинов К.М., Склярёв Е.В., Косарева Л.Р., Лавренчук А.В., Пушкарёв 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.
19. Константинов К.М., Артёмова Е.В., Константинов И.К., Яковлев А.А., Киргуев А.А. Возможности метода анизотропии магнитной восприимчивости в решении геолого-геофизических задач поисков коренных месторождений алмазов // Геофизика. 2018. № 1. С. 67–77. EDN: YWMSHU.
20. Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов. СПб.: Питер, 2003. 688 с.
21. 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.
22. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 191 с.
23. 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. Vol. 42. P. 243–263. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.016>.
24. Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костерев А.Н., Морозов В.А., Михалев А.О. [и др.]. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2 // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 150–155. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.
25. Parshin A.V., Morozov V.A., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey // Geo-Spatial Information Science. 2018. Vol. 21. Iss. 1. P. 67–74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>.

References

1. Fedorovsky V.S., Likhachev A.B., Rile G.V. Terrane-continent collision zone in the Western Baikal region: collision suture structure. In: Karyakin Yu.V. (ed.). *Tectonics of Asia*. Moscow: GEOS; 1997, p. 228-232. (In Russ.).
2. 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: YVJJJIH.
3. Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V. The Olkhon geodynamic proving ground (Lake Baikal): high resolution satellite data and geological maps of new generation. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2010;1(4):331-418. (In Russ.). EDN: NTLDVH.
4. 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: E.V. Sklyarov (ed.). *Structural and tectonic correlation across the Central Asia orogenic collage: north-eastern segment: guidebook and abstract volume of the Siberian Workshop IGCP-480*. Irkutsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2005, p. 5-76. EDN: QKFEIB.
5. Mazukabzov A.M., Fedorovsky V.S. Collision seam of the Siberian craton – Olkhonsky terrane system in the Western Baikal region. In: *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian movable belt (from ocean to continent): materials of the scientific meeting*. 17–20 October 2017, Irkutsk. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, iss. 15, p. 174-175. (In Russ.). EDN: ZVPSLT.
6. Khain V.E. *Tectonics of continents and oceans (year 2000)*. Moscow: Scientific world; 2001, 606 p. (In Russ.).
7. Logachev N.A. History and geodynamics of the Baikal rift. *Geologiya i geofizika*. 2003;44(5):391-406. (In Russ.). EDN: MMWIPW.
8. Matz V.D., Ufimtsev G.F., Mandelbaum M.M. The Baikal basin in the Cenozoic: structure and geologic history. Novosibirsk: Geo; 2001, 249 p. (In Russ.).
9. Lunina O.V., Gladkov A.S., Cheremnykh A.V. Fracturing in the Primorsky fault zone (Baikal rift system). *Geologiya i geofizika*. 2002;43(5):446-455. (In Russ.). EDN: UZWRLY.
10. Letnikov F.A., Savelyeva V.B. Manifestation of processes of endogenous fluidization of the earth's crust in Priolkhonya. In: *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian movable belt (from the ocean to the continent): materials of the scientific meeting*. 16–20 October 2006, Irkutsk. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2006, iss. 4, p. 212-216. (In Russ.).
11. Sklyarov E.V., Fedorovskii V.S., Gladkochub D.P., Vladimirov A.G. Synmetamorphic basic dikes as indicators of collision structure collapse in the Western Baikal region. *Doklady Earth Sciences*. 2001;381A:1028-1033. EDN: LGPNEZ.
12. Konstantinov K.M., Sklyarov E.V., Zhang Kh., Kosareva L.R., Konstantinov I.K., Konstantinov G.K., et al. Petro- and paleomagnetism of collision suture dolerite dike of the Siberian craton-Olkhon terrane system (Yelantsy settlement, Western Baikal region). In: *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian movable belt (from ocean to continent): materials of the scientific meeting*. 14–18 October 2025, Irkutsk. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2025, iss. 23, p. 133-135. (In Russ.).



13. Pisarevsky S.A., Gladkochub D.P., Donskaya T.A., De Waele B., Mazukabzov A.M. Palaeomagnetism and geochronology of mafic dykes in south Siberia, Russia: the first precisely dated Early Permian palaeomagnetic pole from the Siberian craton. *Geophysical Journal International*. 2006;167(2):649-658. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03160.x>.
14. Kotov A.B., Kovach V.P., Skovitina T.M., Lopatin D.V., Donskaya T.V., Sklyarov E.V., et al. Sources of Cenozoic sandy deposits of Olkhon Island (Baikal rift zone): results of U-Th-Pb geochronological (LA-ISP-MS) studies. In: *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian movable belt (from ocean to continent): materials of the scientific meeting*. 17–20 October 2017, Irkutsk. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017, iss. 15, p. 145-146. (In Russ.). EDN: ZVOYNR.
15. Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Kozlovsky A.M., et al. Late Paleozoic-Early Mesozoic rift system of Central Asia: magmatism composition and sources, formation patterns and geodynamics. In: M.G. Leonov (ed.). *Problems of Central Asian tectonics*. Moscow: GEOS; 2005, p. 197-236. (In Russ.). EDN: QKIZFF.
16. Tsygankov A.A., Matukov D.I., Berezhnaya N.G., Larionov A.N., Posokhov V.F., Tsyrenov B.Ts., et al. Late Paleozoic granitoids of Western Transbaikalia: magma sources and stages of formation. *Geologiya i geofizika*. 2007;48(1):156-180. (In Russ.). EDN: HYIWBH.
17. Konstantinov K.M., Khuzin M.Z., Gladkochub D.P. Late Paleozoic natural remanent magnetisation of dike swarms in the south of the Siberian Platform. In: *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian movable belt (from ocean to continent): materials of the scientific meeting*. 16–20 October 2006, Irkutsk. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2006, iss. 4, p. 171-74. (In Russ.).
18. 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 subsoil use*. 2025;48(1):24-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-1-24-49>. EDN: ALWDXW.
19. Konstantinov K.M., Artemova E.V., Konstantinov I.K., Yakovlev A.A., Kirguez A.A. Possibilities of the method of anisotropy of magnetic susceptibility in the solution of geologic-geophysical problems of search radical diamond fields. *Geophysics*. 2018;1:67-77. (In Russ.). EDN: YWMSHU.
20. Borovikov V.P. *STATISTICA. The art of data analysis on a computer: for professionals*. St. Petersburg: Piter; 2003, 688 p. (In Russ.).
21. 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.
22. Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. *Modeling in exploration geophysics*. Moscow: Nedra; 1987, 191 p. (In Russ.).
23. 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.jgr.2016.10.016>.
24. Parshin A.V., Bydyak A.E., Blinov A.V., Kosterev A.N., Morozov V.A., Mikhalev A.O., et al. Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structural geological mapping and prospecting for ore deposits in composite topography. Part 2. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2016;S6:150-155. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.
25. Parshin A.V., Morozov V.A., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey. *Geo-Spatial Information Science*. 2018;21(1):67-74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>.

Информация об авторах / Information about the authors



Константинов Константин Михайлович,
доктор геолого-минералогических наук,
руководитель департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
✉ 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, Russian Federation,
✉ konstantinovkm@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>



Гаченко Сергей Владимирович,

кандидат геолого-минералогических наук,
руководитель департамента геоинформатики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
gsv@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1594-9441>

Sergey V. Gachenko

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Head of the Geoinformatics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
gsv@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1594-9441>

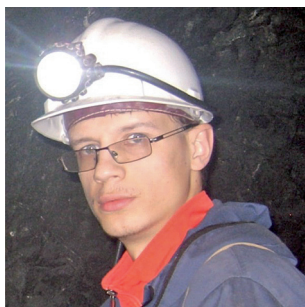


Константинов Герман Константинович,

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

German K. Konstantinov,

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

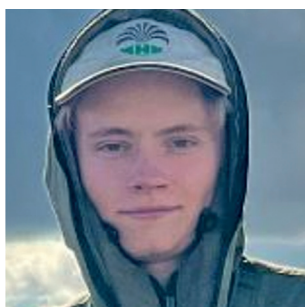


Константинов Иннокентий Константинович

инженер-исследователь департамента рудной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
geologiaforever@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-5013-6241>

Innokenty K. Konstantinov,

Research Engineer, Department of Ore Geology,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
geologiaforever@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-5013-6241>



Лаппо Артём Сергеевич,

студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
lappoas@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0009-1745-6251>

Artem S. Lappo,

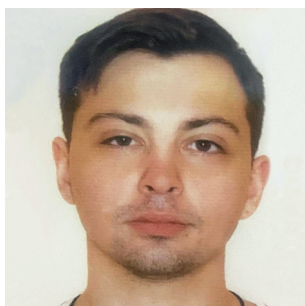
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
lappoas@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0009-1745-6251>



Панкевич Вероника Алекссндровна,
студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
pankevichveronika1404@mail.ru,
<https://orcid.org/0009-0000-0854-4959>
Veronika A. Pankevich,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
pankevichveronika1404@mail.ru,
<https://orcid.org/0009-0000-0854-4959>



Светлаков Андрей Алексеевич,
студент,
Институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
Dushas13372@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-1577-2580>
Andrei A. Svetlakov,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
Dushas13372@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-1577-2580>



Сиселятин Егор Андреевич,
студент,
Институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
e.siselyatin@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0004-6749-2131>
Egor A. Siselyatin,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
e.siselyatin@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0004-6749-2131>

Вклад авторов / Contribution of the authors

К.М. Константинов – разработка концепции, научное руководство, разработка методологии, курирование данных, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

С.В. Гаченко – разработка методологии, курирование данных, формальный анализ, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Г.К. Константинов – проведение исследования, валидация результатов, визуализация.

И.К. Константинов – проведение исследования, валидация результатов.

А.С. Лаппо – проведение исследования, визуализация.

В.А. Панкевич – проведение исследования.

А.А. Светлаков – проведение исследования, визуализация.

Е.А. Сиселятин – проведение исследования.

Konstantin M. Konstantinov – conceptualization, supervision, methodology, data curation, writing – original draft, writing – editing.

Sergey V. Gachenko – methodology, data curation, formal analysis, writing original draft, writing – editing.

German K. Konstantinov – investigation, validation, visualization.

Innokenty K. Konstantinov – investigation, validation.

Artem S. Lappo – investigation, visualization.



Veronika A. Pankevich – investigation.
Andrei A. Svetlakov – investigation, visualization.
Egor A. Siselyatin – 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 07.05.2026; одобрена после рецензирования 09.06.2026; принята к публикации 18.06.2026.

The article was submitted 07.05.2026; approved after reviewing 09.06.2026; accepted for publication 18.06.2026.