

Ученые записки Казанского университета.

Серия Естественные науки

2023

Т. 165, кн. 4

рецензируемый научный журнал

УЧЕННЫЕ ЗАПИСКИ КАЗАНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ОСНОВАНЫ В 1834 ГОДУ

Редакционная коллегия

Главный редактор

Д.А. Таюрский – д-р физ.-мат. наук, проф., Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

Члены редколлегии

Г.К. Зиятдинова (зам. гл. ред.) – д-р хим. наук, доц., Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
А.Д. Калмыкова (секретарь) – Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
Н.И. Акберова – канд. биол. наук, ст. науч. сотр., Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
И.С. Антипин – д-р хим. наук, проф., чл.-корр. РАН, Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
А.С. Борисов – д-р геол.-минерал. наук, проф., Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
Г.К. Будников – д-р хим. наук, проф., Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
О.П. Ермолаев – д-р геогр. наук, проф., Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
А.А. Варнек – канд. хим. наук, д-р теоретической химии, проф., Страсбургский университет, г. Страсбург, Франция
Р.И. Жданов – д-р хим. наук, проф., Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
И.Б. Ивашина – д-р биол. наук, акад. РАН, Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, г. Пермь, Россия
С.В. Костров – д-р биол. наук, проф., чл.-корр. РАН, Институт молекулярной генетики РАН, г. Москва, Россия
Я. Лабуда – д-р наук, проф., Словацкий технологический университет в Братиславе, г. Братислава, Словацкая Республика
М. Лионати – д-р мед. наук, почётный проф., Университет Вероны, г. Верона, Италия
В.Н. Майстренко – д-р хим. наук, проф., Башкирский государственный университет, г. Уфа, Россия
В.В. Малахов – д-р биол. наук, акад. РАН, Московский государственный университет, г. Москва, Россия
А.И. Мелентьев – д-р биол. наук, проф., Институт биологии УНЦ РАН, г. Уфа, Россия
Д.К. Нургалиев – д-р геол.-минер. наук, проф., Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
А.А. Паутов – д-р биол. наук, проф., Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
Ю.П. Переводенцев – д-р геогр. наук, проф., Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
Р.М. Сабиров – канд. биол. наук, доц., Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
С.Ю. Селивановская – д-р биол. наук, проф., Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
В.В. Силантьев – д-р геол.-минер. доцент, Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
О.Г. Синяшин – д-р хим. наук, акад. РАН, Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань, Россия
Р.Н. Хазипов – д-р мед. наук, Средиземноморский институт нейробиологии, г. Марсель, Франция; Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
Р.Р. Хасанов – д-р геол.-минерал. наук, доц., Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия
Ф. Хеллер – д-р наук, почётный проф., Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, г. Цюрих, Швейцария
К. Ясуи – д-р наук, проф., Университет Хиросимы, г. Хиросима, Япония

Редактор английского текста *А.О. Кармазина*

Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-41874 от 27 августа 2010 г.

Журнал реферируется/индексируется в Scopus, DOAJ, EBSCO, eLIBRARY.RU, Emerging Sources Citation Index, Google Scholar, CAB Abstracts and Global Health, CAS Source Index, GeoRef, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, КиберЛенинка

Подписной индекс 19422. Цена свободная

Адрес издателя и редакции «Ученые записки Казанского университета»: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18
Телефон: (843) 233-73-01; e-mail: uz.ku@kpfu.ru; сайт: <https://uzakuesc.elpub.ru>

Дата выхода в свет 25.12.2023. Формат 70×108/16.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 15,72.
Уч.-изд. л. 12,36. Тираж 300 экз. Заказ 144/12

Отпечатано в типографии Издательства
Казанского университета
420008, Казань, ул. проф. Нужина, д. 1/37

Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta.

Seriya Estestvennye Nauki (Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series) Peer-Reviewed Scientific Journal

2023
Vol. 165,
no. 4

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA FOUNDED IN 1834

Editorial Board

Editor-in-Chief

Dmitrii A. Tayurskii – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia

Members of Editorial Board

Guzel K. Ziyatdinova (Deputy Editor-in-Chief) – Doctor of Chemistry, Associate Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia
Alena D. Kalmykova (Secretary) – Kazan Federal University, Kazan, Russia
Natalya I. Akberova – PhD in Biology, Associate Professor, Senior Research Fellow, Kazan Federal University, Kazan, Russia
Igor S. Antipin – Doctor of Chemistry, Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Kazan Federal University, Kazan, Russia
Anatolij S. Borisov – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia
Herman C. Budnikov – Doctor of Chemistry, Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia
Oleg P. Ermolaev – Doctor of Geography, Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia
Renad I. Zhdanov – Doctor of Chemistry, Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia
Friedrich Heller – Doctor of Science, Professor Emeritus, Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, Zürich, Switzerland
Irina B. Ivshina – Doctor of Biology, Member of Russian Academy of Sciences, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russia
Rinat R. Khasanov – Doctor of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia
Roustem N. Khazipov – Doctor of Medicine, Mediterranean Institute of Neurobiology, Marseille, France; Kazan Federal University, Kazan, Russia
Sergey V. Kostrov – Doctor of Biology, Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Institute of Molecular Genetics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
Jan Labuda – Doctor of Science, Professor, Slovak University of Technology in Bratislava, Bratislava, Slovak Republic
Massimo Libonati – Doctor of Medicine, Emeritus Professor, Verona University, Verona, Italy
Valerii N. Maistrenko – Doctor of Chemistry, Professor, Bashkir State University, Ufa, Russia
Vladimir V. Malakhov – Doctor of Biology, Member of Russian Academy of Sciences, Moscow State University, Moscow, Russia
Aleksandr I. Melentiev – Doctor of Biology, Professor, Institute of Biology, Ufa Research Center of Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia
Danis K. Nurgaliev – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia
Anatolii A. Pautov – Doctor of Biology, Professor, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia
Jurij P. Perevedentsev – Doctor of Geography, Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia
Rushan M. Sabirov – PhD in Biology, Associate Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia
Svetlana Ju. Selivanovskaya – Doctor of Biology, Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia
Vladimir V. Silantev – Doctor of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia
Oleg G. Sinyashin – Doctor of Chemistry, Member of Russian Academy of Sciences, Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry, FRC Kazan Scientific Center of RAS, Kazan, Russia
Alexandre Varnek – PhD in Chemistry, Professor, Habilitation in Theoretical Chemistry, University of Strasbourg, Strasbourg, France
Kinya Yasui – Doctor of Science, Professor, Hiroshima University, Hiroshima, Japan

English Editor: *A.O. Karmazina*

Founder and Publisher: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Kazan (Volga Region) Federal University”
The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Media
Registration certificate PI No. FS77-41874 dated August 27, 2010

The journal is abstracted and/or indexed in Scopus, DOAJ, EBSCO, eLIBRARY.RU, Emerging Sources Citation Index, Google Scholar, CAB Abstracts and Global Health, CAS Source Index, GeoRef, Cyberleninka, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat

Subscription index: 19422. Free price

Contacts: Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta, ul. Kremlevskaya 18, Kazan, 420008 Russia
Phone: (843) 233-73-01; e-mail: uz.ku@kpfu.ru; website: <https://uzakuesc.elpub.ru>

Date of publication: December 25, 2023. Page size: 70×108/16.
Offset printing. Conventional printing sheet: 15.72. Publisher's
signature: 12.36. Circulation: 300 copies. Order: 144/12

Printed in KFU Publishing House
ul. Prof. Nuzhina 1/37, Kazan, 420008 Russia

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Хохлов А.В., Гвоздик Г.А., Лебедев И.Е.</i> О статистической точности палеонаправлений.....	513
<i>Шелепов Д.А., Гужиков А.Ю.</i> Результаты магнитостратиграфических исследований сызранской свиты (палеоцен) разреза Песчаный Умет (г. Саратов).....	524
<i>Щербакова В.В., Веселовский Р.В., Жидков Г.В., Афиногенова Н.А., Самсонов А.В., Степанова А.В., Смирнов М.А.</i> Палеомагнетизм Великой дайки Кольского полуострова (2.68 млрд лет): новые свидетельства ультранизкой напряженности магнитного поля Земли в позднем архее.....	537
<i>Парфирьев Н.П., Данукалов К.Н., Голованова И.В., Дьякова С.А.</i> Первые результаты теста внутрiformационных конгломератов в катавской свите позднего риффея (Южный Урал).....	550
<i>Косарева Л.Р., Нурғалиева Н.Г., Нурғалиев Д.К., Ли Х.-Ч., Крылов П.С., Кузина Д.М., Антоненко В.В.</i> Предварительные магнитно-минералогические исследования неоплейстоцен-голоценовых осадков озера Тургояк.....	563
<i>Щербаков В.П., Сычева Н.К.</i> Расчет потенциальных барьеров и блокирующих температур малых псевдооднородных частиц методами микромагнетизма.....	577
<i>Фетисова А.М., Веселовский Р.В., Голубев В.К.</i> Палеомагнетизм границы перми- триаса Оренбургской области (Восточно-Европейская платформа, Волго-Уральская антеклиз).....	590
<i>Старченко С.В., Яковлева С.В.</i> Сравнительный эволюционный анализ дипольных и недипольных компонент геомагнитной энергии.....	606
<i>Юсупова А.Р., Нурғалиева Н.Г., Кузина Д.М., Сотникова В.Ф., Муликова Д.И.</i> Предварительные магнитно-минералогические исследования донных отложений озера Белое (Южная Сибирь, Россия).....	620
<i>Лебедев И.Е., Павлов В.Э., Минаев П.А.</i> Ошибки ориентирования палеомагнитных образцов при использовании магнитного компаса и возможные пути их преодоления.....	633
<i>Элькина Д.В., Гусев Е.А., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Костромина Н.А., Новихина Е.С., Гостенина А.А., Яржембовский Я.Д., Пискарев А.Л., Крылов А.А., Ованесян Г.И., Жамойда В.А.</i> Первые результаты комплексных исследований, включая палеомагнитные, колонок донных осадков из Восточно-Сибирского моря.....	646
<i>Силантьев В.В., Гутак Я.М., Тихомирова М., Кесснер А., Пороховниченко Л.Г., Карасев Е.В., Фелькер А.С., Уразаева М.Н., Жаринова В.В.</i> Позднекунгурский радиоизотопный возраст границы между балахонской и кольчугинской сериями Кузнецкого бассейна (Западная Сибирь, Россия) – дополнительное обоснование валидности уфимского яруса Восточно-Европейской шкалы пермской системы.....	664
<i>Мифтахутдинова Д.Н.</i> Применение ихнофоссилий для корреляции нефтеносных отложений терригенного девона (пашийский и тиманский горизонты) Южно-Татарского свода.....	688

CONTENTS

<i>Khokhlov A.V., Gvozdik G.A., Lebedev I.E.</i> On the statistical accuracy of paleodirections.....	513
<i>Shelepov D.A., Guzhikov A.Yu.</i> Results of the magnetostratigraphic studies of the Syzran Formation (Paleocene) in the Peschanyi Umyot section (Saratov, Russia).....	524
<i>Shcherbakova V.V., Veselovskiy R.V., Zhidkov G.V., Aphinogenova N.A., Samsonov A.V., Stepanova A.V., Smirnov M.A.</i> Paleomagnetism of the Great Dyke of the Kola Peninsula (2.68 Ga): New evidence of ultra-low paleointensity of the Earth's magnetic field in the Late Archean.....	537
<i>Parfiriev N.P., Danukalov K.N., Golovanova I.V., Dyakova S.A.</i> First results of the intraformational conglomerate test of the Late Riphean Katav Formation (Southern Urals).....	550
<i>Kosareva L.R., Nurgalieva N.G., Nurgaliev D.K., Li H.-C., Krylov P.S., Kuzina D.M., Antonenko V.V.</i> Preliminary magnetic mineralogical studies of the Neopleistocene-Holocene sediments from Lake Turgoyak.....	563
<i>Shcherbakov V.P., Sycheva N.K.</i> Calculation of potential barriers and blocking temperatures of small pseudo-single-domain particles by micromagnetism methods.....	577
<i>Fetisova A.M., Veselovskiy R.V., Golubev V.K.</i> Paleomagnetism of the Permian-Triassic Boundary of the Orenburg Region (East European Platform, Volga-Ural Antecline).....	590
<i>Starchenko S.V., Yakovleva S.V.</i> Comparative evolutionary analysis of dipole and non-dipole components of geomagnetic energy.....	606
<i>Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Kuzina D.M., Sotnikova V.F., Mulikova D.I.</i> Preliminary magnetic mineralogical studies of Lake Beloe sediments (Southern Siberia, Russia).....	620
<i>Lebedev I.E., Pavlov V.E., Minaev P.A.</i> Orientation errors of paleomagnetic samples when using a magnetic compass and possible ways to overcome them.....	633
<i>Elkina D.V., Gusev E.A., Ryabchuk D.V., Sergeev A.Yu., Kostromina N.A., Novikhina E.S., Gostenina A.A., Yarzhembovsky Ya.D., Piskarev A.L., Krylov A.A., Ovanesyan G.I., Zhmoida V.A.</i> First results of the comprehensive analysis, including the paleomagnetic studies, of sediment cores from the East Siberian Sea.....	646
<i>Silantiev V.V., Gutak Ya.M., Tichomirowa M., Käßner A., Porokhovnichenko L.G., Karasev E.V., Felker A.S., Urazaeva M.N., Zharinova V.V.</i> Late Kungurian radioisotope age of the boundary between the Balakhonka and Kolchugino Groups in the Kuznetsk Basin (Western Siberia, Russia) – additional evidence for the validity of the Ufimian Stage of the East European Permian.....	664
<i>Miftakhutdinova D.N.</i> Using ichnofossils to correlate oil-bearing deposits in the Devonian clastic succession (Pashyan and Timanian Horizons) of the South Tatar Arch.....	688

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.384.7+550.384.31

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.513-523

О СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ПАЛЕОНАПРАВЛЕНИЙ

А.В. Хохлов¹, Г.А. Гвоздик², И.Е. Лебедев³

¹*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
Москва, 117997, Россия*

²*Геофизический центр Российской академии наук, Москва, 119296, Россия*

³*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия*

Аннотация

В статье рассматриваются вопрос применимости подхода Р.А. Фишера к анализу направлений образцов в потоке изверженных пород. Предложен тест гипотезы существования общего для всех образцов направления древнего поля.

Ключевые слова: палеомагнетизм, вулканисты, метод Фишера, статистика направлений.

Введение

По найденным в каждом образце векторам остаточной намагниченности последующей обработкой данных получают направление, отвечающее группе образцов. При этом возникает важный вопрос: насколько это направление близко к направлению древнего поля и как можно количественно оценить возможное отклонение? На результат магнитных чисток отдельного образца из потока всегда влияют не вполне контролируемые эффекты, связанные как с неоднородностью химического состава образца, так и с искажениями в процессе лабораторного анализа. Поэтому естественно, что неопределенность направления для группы образцов характеризуют в статистических терминах. Но, например, усреднение единичных векторов отдельных направлений вне дополнительных статистических гипотез не дает возможности судить о количественных характеристиках возможного отклонения направления усреднения от направления древнего поля.

Метод Р.А. Фишера обработки группы направлений (далее для краткости будем упоминать его как «метод α_{95} ») [1–3] предполагает, что измеренные направления в образцах, взятых из потока лавы, можно статистически описать формулой Фишера осесимметричного распределения, зависящего от единственного неизвестного параметра концентрации $k > 0$, и дополнительно принять, что ось симметрии задает направление древнего поля. Формула Фишера задает плотность распределения углов φ отклонения от оси. Параметрическая гипотеза позволяет количественно оценивать область (вокруг направления усреднения), в которой с вероятностью 0.95 лежит направление оси симметрии. Проблема, однако, в том, что распределение Фишера для группы образцов экспериментально наблюдается лишь как исключительная ситуация, что иллюстрирует обзор большого числа публикаций на эту тему [4]. При этом формула распределения Фишера от-

вечает асимптотике реальных распределений при уменьшении величин углов φ , а статистические тесты проверки гипотезы Фишера требуют значительного числа образцов в группе (порядка 30).

Происхождение формулы Фишера гипотетического распределения в общих чертах следующее:

1. Предполагается, что окончательный результат магнитных чисток *любого образца из потока* можно представить как векторную сумму истинного направления и изотропного случайного гауссова вектора с нулевым математическим ожиданием и фиксированной дисперсией (являющейся функцией параметра концентрации k), этот вектор соответствует неконтролируемым эффектам определения NRM.

2. Предполагается, что распределение векторов единичной длины, отвечающих направлениям, определено условной плотностью распределения трехмерных векторов, т. е. сужением трехмерной плотности распределения на единичную сферу. Это предположение и обеспечивает асимптотическую точность формулы Фишера.

Первое предположение основано на сомнительном допущении, что неконтролируемые ошибки реконструкции по разным образцам нужно считать одинаковыми [5]. В реальности разница возникает потому, что процедура реконструкций [3, 6] вполне допускает нефиксированное число чисток по разным образцам, а также имеются неучитываемые факторы, связанные с химическим составом образцов. Индивидуальные различия процедур реконструкции можно частично отследить при помощи введенной в работе [6] количественной характеристики MAD (Maximal Angular Deviation), которая обычно варьируется от образца к образцу.

Возможная проблема использования гипотезы Фишера о распределении состоит в том, что хотя усреднение единичных векторов всегда можно вычислить, но в случае ошибочной идентификации нескольких разных потоков как единого потока, становится не ясно как связать направление общего усреднения с реальным направлением древнего поля: формальный ответ в методе α_{95} всегда будет использовать усреднение всех направлений, но информация о точности такого ответа станет малосодержательной. Анализ влияния неизбежных неточностей метода Фишера на концептуальные выводы об эволюции магнитного поля Земли содержится в [7].

Было бы полезно иметь грубый тест для проверки на небольшом количестве образцов гипотезы о существовании направления, отличающегося от каждого направления из группы не более чем на величину соответствующей точности, т. е. речь идет о влиянии точности определения направлений образцов на точность усредненного направления. Можно попробовать выразить статистическую характеристику точности конкретного образца через величину его MAD, однако этот подход, как показано в [8], возможен лишь в статистическом смысле, т. е. по ансамблю образцов с данным MAD. К тому же при анализе изверженных пород прежде не было принято публиковать значения MAD по отдельным образцам и другие данные по числу и величинам магнитных чисток отдельных образцов.

Если использовать специальную параметрическую гипотезу [8] для оценки точности направления для отдельного образца, то предлагаемый тест будет опи-

раться лишь на предположение о независимом характере измерений отдельных образцов. Новый тест позволит проверить существование общего направления (центра) для группы образцов, и его стоит рассматривать как дополнительный к уже имеющимся способам обработки данных. Далее следует объяснение построения такого теста и представлены результаты его применения к новым реальным данным об изверженных породах Чукотки.

1. Методы реконструкций и статистическая точность

1.1. Свойства направлений для отдельного образца. В настоящее время метод реконструкции направления древнего поля в отдельно взятом образце использует метод главных компонент [6] – собственных векторах 3×3 -матрицы, составленной по данным магнитных чисток. Имеются две версии построения такой матрицы, при этом несколько чаще используют центральную версию (английский термин – anchored principal component, или сокращенно – aPC [9]). Мы используем параметрическую гипотезу из [8] о том, что на каждом шаге магнитной чистки вектор разницы двух измерений является гауссовым с математическим ожиданием, направленным параллельно древнему полю так, как показано на рис. 1, а.

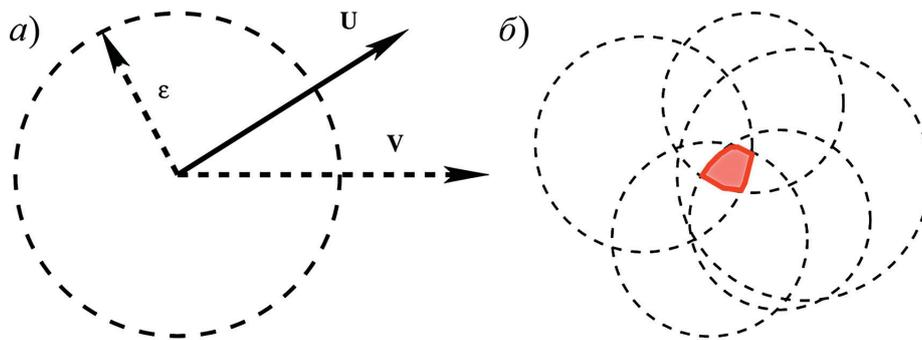


Рис. 1. а) Гипотеза о шаге магнитной чистки. Вектор \mathbf{U} – измеренное приращение на шаге магнитной чистки, единичный вектор \mathbf{V} указывает истинное направление древнего поля, вектор $\boldsymbol{\varepsilon}$ обозначает гауссово случайное отклонение с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 ; б) идея теста, использующего доверительные области (точности) отдельных образцов: пересечение указывает возможное расположение направления древнего поля

На отдельном шаге магнитной чистки приращение измеряемого магнитного поля определяется случайным гауссовым вектором \mathbf{U} , который является суммой фиксированного вектора \mathbf{V} истинного направления древнего поля и случайного гауссова отклонения $\boldsymbol{\varepsilon}$ с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 , которая полагается зависимой лишь от исследуемого образца. Величина дисперсии отклонения вектора разницы $\boldsymbol{\varepsilon}$ от направления древнего поля характеризует возможную неточность этого шага чистки, поэтому удобно для величины σ использовать шкалу в процентах от длины единичного вектора по направлению древнего поля \mathbf{V} . Анализ реальных данных магнитных чисток показал, что величина σ вовсе не является пренебрежимо малой, хотя метод главных компонент отчасти компенсирует роль неточностей даже при малом числе магнитных чисток. В статье [8] исследовано влияние числа чисток n и параме-

тра σ на распределение направления, выбранного по методу главных компонент. Установлено, что величина MAD для серии чисток конкретного образца не позволяет выразить величину отклонения этого направления от направления древнего поля, однако статистически по многим образцам такую связь возможно установить.

Разумеется, гипотеза о постоянстве величины дисперсии в процессе нескольких чисток данного образца может быть ослаблена, однако такое усложнение модели пока не представляется необходимым для практики.

Точность реконструкции направления в отдельном образце записывается в виде величины телесного угла конуса вокруг направления, полученного методом главных компонент в серии магнитных чисток, истинное направление древнего поля принадлежит этому конусу с доверительной вероятностью P , конус естественно называть доверительным конусом, отвечающим доверительному уровню P . Выразить аналитически величину телесного угла через параметры n , P и σ явно пока не удалось, но для практики получена таблица значений углов для реалистичных значений этих параметров [10].

В практическом применении можно использовать лишь некоторые значения для σ : 0.1 (хорошая точность), 0.2 (удовлетворительная точность), 0.33 (очень низкая точность). При этом логично ориентироваться на параметр MAD, который может значительно варьироваться от образца к образцу.

1.2. Групповые свойства направлений. Если доверительные конусы различных образцов пересекаются, то направление древнего поля лежит в этом пересечении с вероятностью, которая вычисляется как произведение доверительных вероятностей для конусов (рис. 1, б и конфигурация реальных данных на рис. 2). Тем самым в терминах пересечения доверительных конусов можно указать область (сложной формы, вообще говоря), в которой лежит направление древнего поля с заданной вероятностью. При этом необходимо сделать предположение о величине параметра σ , характеризующего качество магнитной чистки образцов. Если же доверительные конусы не пересекаются, то это указывает на несовместимость предположения о точности образцов с предположением общего для них направления древнего поля.

Для теста сначала выбирают требуемые доверительные вероятности конусов образцов. Например, для пяти образцов средней точности, отобранных из одного потока, следует рассмотреть на сфере пересечение их 0.99-доверительных конусов. Вероятность попасть в это пересечение будет равна $0.99^5 \sim 0.951$. Если пересечение доверительных конусов для образцов окажется пустым, то это будет указанием на то, что данная группа направлений не должна рассматриваться как случайные независимые отклонения от истинного направления древнего поля. Поскольку в методе α_{95} и при пустом пересечении усредненное направление может быть вычислено, то тест укажет на то, что связь усреднения и направления древнего поля сомнительна при допущенных предположениях о точности направлений образцов. Пример такой ситуации возникнет, например, если для реальных данных на рис. 2 положить $\sigma = 0.1$ (т. е. предположить хорошую точность при магнитной чистке) вместо $\sigma = 0.2$.

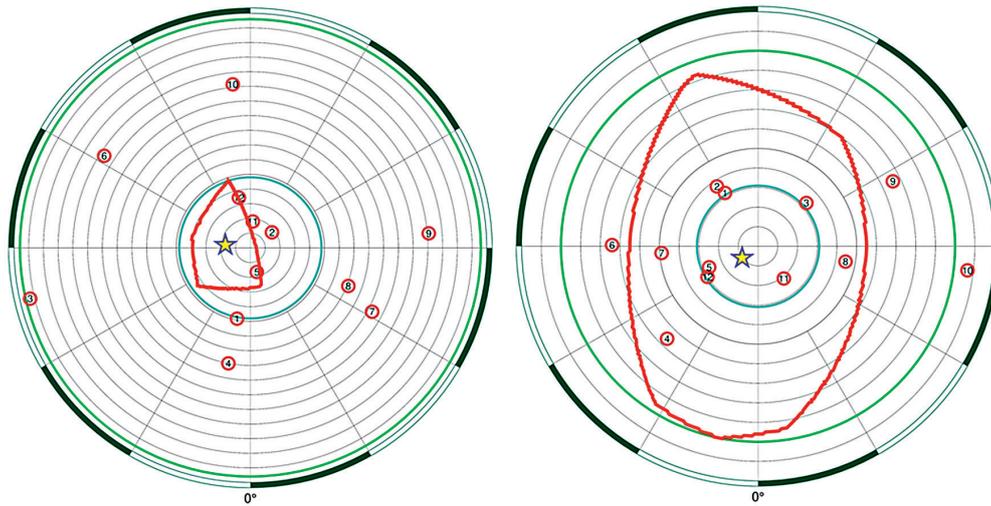


Рис. 2. Направления в двух реальных потоках показаны в равноплощадной азимутальной проекции Ламберта, центрированной на усреднение всех направлений. Сетка угловых расстояний от центра проекции показана с интервалом в один градус, выделены цветом и толщиной линий круговые области по Фишеру для центра и для всех образцов при вероятности $P = 0.95$. Для значения $\sigma = 0.2$ показана область пересечения (сложной формы), ее барицентр отмечен звездочкой

Поскольку область пересечения имеет сложную форму, то в градусной мере непросто охарактеризовать точность реконструкции древнего поля. Кроме того, эта область зачастую оказывается геометрически больше доверительной области при $P = 0.95$ для центра распределения Фишера. Это связано с тем, что метод α_{95} опирается на чрезвычайно сильное (но верное заведомо лишь асимптотически) предположение о характере распределения группы направлений образцов. Иными словами, область вокруг усреднения направлений интерпретировать как возможные направления древнего поля возможно лишь когда отклонения направлений отдельных образцов весьма малы. Для сложной области пересечения доверительных конусов (если такое пересечение вообще существует) никаких асимптотик не требуется, но и предлагаемый тест отвечает лишь общей гипотезе существования единого направления для независимых измерений направлений образцов (по модулю гипотезы о свойствах точности магнитной чистки). Метод α_{95} отвечает на совсем другой вопрос: в какой области лежит математическое ожидание направлений образцов по модулю гипотезы Фишера о распределении этих направлений. Очевидно, что новый тест привносит некоторые ограничения применимости метода α_{95} .

При непустом пересечении доверительных областей для образцов рассмотрим положение барицентра области. Действительно, в рамках принятой параметрической гипотезы барицентр показывает усреднение всех мыслимых ошибок всех возможных магнитных чисток. Естественно предположить, что эти все ошибки при усреднении взаимоуничтожаются. Поэтому достаточно предсказуемо, что направление барицентра зачастую будет достаточно близким к усреднению направлений методом α_{95} . Это подтверждается прямым экспериментом и является достаточно естественным по смыслу: в обоих случаях речь идет об усреднениях, но с учетом или без учета точности направлений имеющихся образцов. Отсюда следует оптимистический вывод, что накопленные в базах дан-

ных изверженных пород направления примерно отвечают реальности, лишь за исключением ситуаций ошибочного отождествления различных потоков изверженных пород. Предлагаемый метод учета точности чисток образцов позволит в некоторых неочевидных случаях идентифицировать такие ситуации, тем самым его следует рассматривать как корректирующую поправку к методу α_{95} . К сожалению, сейчас невозможно провести такую коррекцию по ранним публикациям, поскольку отсутствуют данные о числе магнитных чисток для каждого образца из потока. Но в будущем появляется возможность более аккуратных ответов.

Необходимо пояснить, что хотя барицентр и лежит в области пересечения доверительных полюсов, он является лишь оценкой (наилучшей в некотором точном смысле) положения истинного направления древнего поля. В целом, это направление может реализоваться с вероятностью P в произвольной точке этой сложной области. Поэтому, чтобы максимизировать значение P (на рис. 2 $P = 0.95$) следует выбирать как можно большие доверительные конусы вокруг направлений образцов. По аналогии в методе α_{95} можно рассматривать круговую область вокруг центра, в которую попадут с вероятностью P направления любых образцов при условии справедливости гипотезы Фишера. В предположении хорошей точности всей обработки лишь для чуть более 20% потоков существуют непустые доверительные области, в которые попадает ось симметрии распределения. На рис. 2 отмечены обе круговые области для значения $P = 0.95$.

2. Краткая геологическая характеристика объекта и палеомагнитных данных

Для тестирования метода был выбран хорошо изученный в палеомагнитном плане объект, расположенный в пределах Охотско-Чукотского вулканогенного пояса – одной из крупнейших окраинно-континентальных вулканогенных провинций в истории Земли. Пояс сложен разнообразными вулканическими, реже вулканогенно-осадочными породами. При относительно небольшой ширине (первые сотни километров) выходы Охотско-Чукотского вулканогенного пояса протягиваются практически вдоль всего Северо-Востока Евразии на более чем 3 000 км. Дискуссии вокруг возраста формирования провинции идут до сих пор, однако, согласно современным прецизионным изотопно-геохронологическим данным, принимается как альб-кампан (106–74 млн лет) [11–13]. Непосредственно объект исследования – Купол – находится на западной Чукотке к востоку от одноименного крупного золото-серебряного месторождения. Согласно нашим новым изотопным данным, возраст конкретно изученных разрезов ограничен рамками 88–84 млн лет [14].

Отбор палеомагнитных образцов с объекта проводили по стандартной сайтовой методике [15]. Ориентирование каждого образца производилось с помощью магнитного и солнечного компасов. Всего для палеомагнитных исследований было отобрано 7 разрезов, включающих по 4–22 сайта (всего 78 сайтов) по 7–15 индивидуальных образцов. На всех 1024 образцах были проведены стандартные лабораторные палеомагнитные процедуры по получению палеомагнитных направлений в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН (г. Москва) на оборудовании ЦКП «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» [16].

Разные аспекты палеомагнетизма с объекта Купол обсуждены в работах [17, 18], где можно найти более детальное описание геологической позиции и палеомагнитных данных.

3. Результаты теста

Рассмотрены образцы со всех 78 сайтов и к каждой группе образцов применен тест при двух разных предположениях точности чисток: хорошей и удовлетворительной (иными словами, при значениях σ , равных 0.1 и 0.2). Предположение крайне низкой точности определения направлений (т. е. $\sigma = 0.33$) плохо согласуется с величинами вычисленных показателей MAD и поэтому не рассматривалось. В предположении хорошей точности окажется, что лишь для чуть более 20% потоков существуют непустые доверительные области для древнего поля. В предположении удовлетворительной точности (т. е. при $\sigma = 0.2$) 90% потоков показывают существование непустых доверительных областей для общего направления древнего поля, а исключительными и потому подлежащими дополнительной проверке являются группы образцов в остальных 10% потоков. Для существующих доверительных областей различия направлений их барицентров от направлений соответствующих усреднений по образцам превышают четыре градуса в 7% случаев, в 74% процентах случаев эти различия составляют менее двух градусов, а в 36% случаев – менее одного градуса. Формы доверительных областей варьируются, но, как правило, их размеры превышают размеры областей, найденных по методу α_{95} .

4. Заключение

Практическое применение показало, что новый тест вполне может выделять группы образцов, для которых использование метода α_{95} является сомнительным. При этом не требуется большого набора образцов, чтобы установить факт отличия распределения направлений образцов от предписываемого формулой Фишера. В случае непустой доверительной области для направления древнего поля тест не дает оснований вводить значимые поправки к направлению, получаемому по формуле Фишера. Таким образом, новый тест целесообразно использовать одновременно с обработкой группы направлений традиционным методом α_{95} для большей обоснованности. Авторы работают над имплементацией нового теста в пакет программ для обработки лабораторных результатов палеомагнитных данных.

Благодарности. А.В. Хохлов выполнил исследование при поддержке гранта РНФ № 22-17-00114, <https://rscf.ru/project/22-17-00114/>.

Полевые работы и лабораторная обработка каменного материала производились И.Е. Лебедевым при поддержке гранта РНФ № 23-17-000112, <https://rscf.ru/project/23-17-000112/>.

Литература

1. Fisher R.A. Dispersion on a sphere // Proc. R. Soc. A. 1953. V. 217, No 1130. P. 295–305. <https://doi.org/10.1098/rspa.1953.0064>.
2. Fisher N.I., Lewis T., Embleton B.J.J. Statistical Analysis of Spherical Data. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987. 344 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511623059>.
3. Tauxe L., Banerjee S.K., Butler R.F., Van der Voo R. Essentials of Paleomagnetism, 5th Web ed., 2018. URL: <http://magician.ucsd.edu/essentials/WebBook.html>.
4. Heslop D., Scealy J.L., Wood A.T.A., Tauxe L., Roberts A.P. A bootstrap common mean direction test // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2023. V. 128, No 8. Art. e2023JB026983. <https://doi.org/10.1029/2023JB026983>.

5. *Chou R.-j.* Small sample theory of the Langevin distribution // *Aust. N. Z. J. Stat.* 1986. V. 28, No 3. P. 335–344. <https://doi.org/10.1111/j.1467-842X.1986.tb00706.x>.
6. *Kirschvink J.L.* The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data // *Geophys. J. Int.* 1980. V. 62, No 3. P. 699–718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x>.
7. *Heslop D., Roberts A.P.* Uncertainty propagation in hierarchical paleomagnetic reconstructions // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2020. V. 125, No 6. Art. e2020JB019488. <https://doi.org/10.1029/2020JB019488>.
8. *Khokhlov A., Hulot G.* Principal component analysis of palaeomagnetic directions: Converting a Maximum Angular Deviation (MAD) into an α_{95} angle // *Geophys. J. Int.* 2016. V. 204, No 1. P. 274–291. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv451>.
9. *Heslop D., Roberts A.P.* Analyzing paleomagnetic data: To anchor or not to anchor? // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2016. V. 121, No 11. P. 7742–7753. <https://doi.org/10.1002/2016JB013387>.
10. *Khokhlov A., Gvozdk G.* The process of reconstructing the ancient magnetic field direction: A new approach to paleomagnetic data for a better estimate of accuracy // *Appl. Sci.* 2023. V. 13, No 8. Art. 4717. <https://doi.org/10.3390/app13084717>.
11. *Акинин В.В., Миллер Э.Л.* Эволюция известково-щелочных магм Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // *Петрология.* 2011. Т. 19, № 3. С. 249–290.
12. *Тихомиров П.Л.* Меловой окраинно-континентальный магматизм Северо-Востока Азии и вопросы генезиса крупнейших фанерозойских провинций кремнекислого вулканизма. М.: ГЕОС, 2020. 376 с.
13. *Geologic Time Scale 2020 / Ed. by F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.B. Schmitz, G.M. Ogg.* Oxford: Elsevier, 2020. 1390 p.
14. *Тихомиров П.Л., Лебедев И.Е., Люилье Ф., Павлов В.Э.* Стратиграфия комплексов Охотско-Чукотского пояса в верховьях р. Малый Анюй (район месторождения Купол): данные U–Pb- и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.* 2021. Т. 501, № 2. С. 192–198. <https://doi.org/10.31857/S2686739721120148>.
15. *Butler R.F.* Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. Boston: Blackwell Sci. Publ., 1992. 319 p.
16. *Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарев А.В., Фокин И.В., Патонин А.В., Пасенко А.М., Фетисова А.М., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А., Рудько Д.В., Чистякова А.В.* Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» // *Геодинамика и тектонофизика.* 2022. Т. 13, № 2. Ст. 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>.
17. *Bobrovnikova E.M., Lhuillier F., Shcherbakov V.P., Shcherbakova V.V., Zhidkov G.V., Lebedev I.E., Eid B., Pavlov V.E.* High-latitude paleointensities during the Cretaceous Normal Superchron from the Okhotsk–Chukotka Volcanic Belt // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2022. V. 127, No 2. Art. e2021JB023551. <https://doi.org/10.1029/2021JB023551>.
18. *Лебедев И.Е., Бобровникова Е.М., Тихомиров П.Л., Эйд Б., Люилье Ф., Павлов В.Э.* Амплитуда вековых геомагнитных вариаций в позднем мелу по результатам палеомагнитных исследований вулкаников Охотско-Чукотского пояса верхней течения реки малый Анюй (западная Чукотка) // *Физика Земли.* 2022. № 2. С. 41–59. <https://doi.org/10.31857/S0002333722020041>.

Поступила в редакцию 09.10.2023

Принята к публикации 20.11.2023

Хохлов Андрей Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории 3

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

ул. Профсоюзная, д. 84/32, г. Москва, 117997, Россия

E-mail: fbmotion@yandex.ru

Гвоздик Георгий Александрович, инженер лаборатории геомагнитных исследований и геоинформатики

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр РАН

ул. Молодежная, д. 3, г. Москва, 119296, Россия

E-mail: gcras@gcras.ru

Лебедев Иван Евгеньевич, научный сотрудник лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, г. Москва, 123242, Россия

E-mail: lebedev232@ya.ru

ISSN 2542-064X (Print)

ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2023, vol. 165, no. 4, pp. 513–523

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.513-523

On the Statistical Accuracy of Paleodirections

A.V. Khokhlov ^{a*}, G.A. Gvozdk ^{b**}, I.E. Lebedev ^{c***}

^a Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

^b Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia

^c Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
Moscow, 123242 Russia

E-mail: ^{*}fbmotion@yandex.ru, ^{**}gcras@gcras.ru, ^{***}lebedev232@ya.ru

Received October 9, 2023; Accepted November 20, 2023

Abstract

This study examined the applicability of R. Fischer's approach to the analysis of sample directions in the flow of eruptive rocks. A test of the hypothesis that all samples share a common direction of the ancient field was proposed.

Keywords: paleomagnetism, eruptive rocks, Fisher method, directional statistics

Acknowledgements. A.V. Khokhlov was funded by the Russian Science Foundation (project no. 22-17-00114, <https://rscf.ru/project/22-17-00114>).

I.E. Lebedev performed the raw data acquisition and laboratory processing of the specimens under the support of the Russian Science Foundation (project no. 23-17-000112, <https://rscf.ru/project/23-17-000112>).

Figure Captions

Fig. 1. *a*) Demagnetization step hypothesis. Vector U – measured increment at the magnetic cleaning step, unit vector V indicates the true direction of the ancient field, vector ϵ denotes Gaussian random deviation with zero expectation and variance σ^2 ; *b*) a test using confidence regions (accuracy) of individual samples: the intersection area indicates the likely location of the ancient field.

Fig. 2. The directions in two flows are shown in Lambert azimuthal projection centered to the average of all directions. The angular distances grid is one degree, the circular Fisher regions for the probability value of 0.95 are highlighted in color and line thickness. The intersection area for $\sigma = 0.2$ has a complex shape, its barycenter is marked with an asterisk.

References

1. Fisher R.A. Dispersion on a sphere. *Proc. R. Soc. A*, 1953, vol. 217, no. 1130, pp. 295–305. <https://doi.org/10.1098/rspa.1953.0064>.
2. Fisher N.I., Lewis T., Embleton B.J.J. *Statistical Analysis of Spherical Data*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1987. 344 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511623059>.
3. Tauxe L., Banerjee S.K., Butler R.F., Van der Voo R. *Essentials of Paleomagnetism*. 5th Web ed., 2018. URL: <http://magician.ucsd.edu/essentials/WebBook.html>.
4. Heslop D., Scealy J.L., Wood A.T.A., Tauxe L., Roberts A.P. A bootstrap common mean direction test. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2023, vol. 128, no. 8, art. e2023JB026983. <https://doi.org/10.1029/2023JB026983>.
5. Chou R.-j. Small sample theory of the Langevin distribution. *Aust. N. Z. J. Stat.*, 1986, vol. 28, no. 3, pp. 335–344. <https://doi.org/10.1111/j.1467-842X.1986.tb00706.x>.
6. Kirschvink J.L. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys. J. Int.*, 1980, vol. 62, no. 3, pp. 699–718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x>.
7. Heslop D., Roberts A.P. Uncertainty propagation in hierarchical paleomagnetic reconstructions. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2020, vol. 125, no. 6, art. e2020JB019488. <https://doi.org/10.1029/2020JB019488>.
8. Khokhlov A., Hulot G. Principal component analysis of palaeomagnetic directions: Converting a Maximum Angular Deviation (MAD) into an α_{95} angle. *Geophys. J. Int.*, 2016, vol. 204, no. 1, pp. 274–291. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv451>.
9. Heslop D., Roberts A.P. Analyzing paleomagnetic data: To anchor or not to anchor? *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2016, vol. 121, no. 11, pp. 7742–7753. <https://doi.org/10.1002/2016JB013387>.
10. Khokhlov A., Gvozdk G. The process of reconstructing the ancient magnetic field direction: A new approach to paleomagnetic data for a better estimate of accuracy. *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, no. 8, art. 4717. <https://doi.org/10.3390/app13084717>.
11. Akinin V.V., Miller E.L. Evolution of calc-alkaline magmas of the Okhotsk–Chukotka volcanic belt. *Petrology*, 2011, vol. 19, no. 3, pp. 237–277. <https://doi.org/10.1134/S0869591111020020>.
12. Tikhomirov P.L. *Melovoi okrainno-kontinental'nyi magmatizm Severo-Vostoka Azii i voprosy genezisa krupneishikh fanerozoiskikh provintsii kremnekislogo vulkanizma* [Cretaceous Marginal-Continental Magmatism of Northeast Asia and Problems of the Genesis of the Largest Phanerozoic Provinces of Siliceous Volcanism]. Moscow, GEOS, 2020. 376 p. (In Russian)
13. Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.B., Ogg G.M. (Eds.) *Geologic Time Scale 2020*. Oxford, Elsevier, 2020. 1390 p.
14. Tikhomirov P.L., Lebedev I.E., Lhuillier F.J.L., Pavlov V.E. Stratigraphy of the Okhotsk–Chukotka belt in the headwaters of the Malyy Anyui River (the vicinity of Kupol deposit): U–Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age data. *Dokl. Earth Sci.*, 2021, vol. 501, pt. 2, pp. 1059–1064. <https://doi.org/10.1134/S1028334X2112014X>.
15. Butler R.F. *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Boston, Blackwell Sci. Publ., 1992. 319 p.
16. Veselovskiy R.V., Dubinya N.V., Ponomarev A.V., Fokin I.V., Patonin A.V., Pasenko A.M., Fetisova A.M., Matveev M.A., Afinogenova N.A., Rud'ko D.V., Chistyakova A.V. Shared Research

- Facilities “Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism” of the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. *Geodin. Tektonofiz.*, 2022, vol. 13, no. 2, art. 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>. (In Russian)
17. Bobrovnikova E.M., Lhuillier F., Shcherbakov V.P., Shcherbakova V.V., Zhidkov G.V., Lebedev I.E., Eid B., Pavlov V.E. High-latitude paleointensities during the Cretaceous Normal Superchron from the Okhotsk–Chukotka Volcanic Belt. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2022, vol. 127, no. 2, art. e2021JB023551. <https://doi.org/10.1029/2021JB023551>.
18. Lebedev I.E., Bobrovnikova E.M., Tikhomirov P.L., Eid B., Lhuillier F., Pavlov V.E. Amplitude of secular geomagnetic variation in Late Cretaceous based on paleomagnetic studies of the Okhotsk–Chukotka volcanic belt from upper reaches of Malyy Anyui River, West Chukotka. *Izv. Phys. Solid Earth*, 2022, vol. 58, no. 2, pp. 185–202. <https://doi.org/10.1134/S1069351322020045>.

⟨ **Для цитирования:** Хохлов А.В., Гвоздик Г.А., Лебедев И.Е. О статистической точности палеонаправлений // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 513–523. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.513-523>. ⟩

⟨ **For citation:** Khokhlov A.V., Gvozdik G.A., Lebedev I.E. On the statistical accuracy of paleodirections. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 513–523. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.513-523>. (In Russian) ⟩

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.384+551.77+551.763.3(470.4)

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.524-536

РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТОСТРАТИГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЫЗРАНСКОЙ СВИТЫ (ПАЛЕОЦЕН) РАЗРЕЗА ПЕСЧАНЫЙ УМЕТ (г. САРАТОВ)

Д.А. Шелепов, А.Ю. Гужиков

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, 410012, Россия*

Аннотация

Представлены результаты петромагнитного (каппаметрия, термокаппаметрия, анизотропия магнитной восприимчивости, измеренная до и после нагрева пород, параметры магнитного насыщения) и палеомагнитного изучения разреза нижнесызранской подсвиты (палеоцен) Песчаный Умет (г. Саратов). Разрез представлен слабомагнитными силицитами. Палеомагнитные данные по разрезу пригодны для использования в магнитостратиграфических целях. В разрезе обосновано наличие магнитозоны преимущественно обратной полярности, которая является аналогом хрона C27 или C26 или их совокупности. Результаты исследований в совокупности с полученными ранее данными по одновозрастным разрезам на юге Саратовского Правобережья и г. Саратова позволили приступить к разработке магнитостратиграфической схемы палеоцена Поволжья, провести детальную корреляцию сызранской свиты, оценить продолжительность предпалеогенового размыва и уточнить возраст отложений.

Ключевые слова: магнитостратиграфия, петромагнетизм, палеоцен, датский ярус, сызранская свита, Нижнее Поволжье.

Введение

С палеоценом Саратовского Поволжья, несмотря на полуторавековую историю его изучения, по-прежнему связан ряд нерешенных вопросов региональной геологии, обусловленных недостаточностью палеонтологических материалов. Одной из наиболее актуальных стратиграфических проблем является обоснование возраста сызранской свиты, долгое время сопоставлявшейся с зеландским ярусом [1]. В последней версии унифицированной схемы палеогеновых отложений Поволжско-Прикаспийского субрегиона [2] большая часть этой свиты (нижнесызранская подсвита) с известной долей условности отнесена к датскому ярусу. Детальная корреляция разрезов сызранской свиты и выяснение ее соотношения с другими местными стратиграфическими подразделениями Саратовской структурно-фациальной зоны также затруднены [2]. Первые же результаты магнитостратиграфических исследований палеоцена Поволжья, появившиеся в 2022 г. [3, 4], обнаружили, что низы сызранской свиты на юге Саратовского Правобережья и территории г. Саратова (разрез Лысая гора) охвачены разнополярными магнитозонами и, следовательно, являются разновозрастными. Исходя из сопоставления полученных данных со

Шкалой геомагнитной полярности (GPTS) [5], низы палеоцена на юге Саратовской области следовало бы датировать первой половиной датского века, а в Саратове – второй половиной датского века и/или зеландским веком [3, 4]. Для подтверждения столь важных стратиграфических выводов необходимо было убедиться в латеральной устойчивости магнитозоны обратного знака, выделенной в единственном разрезе – Лысая гора [3]. С этой целью нами изучен другой разрез сызранской свиты на территории Саратова – Песчаный Умет, магнитостратиграфическая характеристика которого приведена в настоящей работе.

1. Характеристика разреза

Разрез Песчаный Умет (обн. 3258: $50^{\circ}42'34''$ N; $45^{\circ}38'53''$ E) расположен в карьере по добыче опоки на восточной окраине одноименного села, входящего в состав городского округа Саратова (рис. 1, а, б). В структурном плане разрез расположен в южной части Ульяновско–Саратовского мезо-кайнозойского наложенного прогиба и приурочен к Песчаноуметскому поднятию в пределах Елшанского вала на восточном крыле антиклинали, с которой связано Песчаноуметское месторождение нефти и газа [6]. Азимуты падения пластов варьируют от 118° до 150° , углы падения – от 30° до 48° [6]. В разрезе видимой мощностью ~ 25 м на маастрихтских карбонатных алевроито-песчанистых глинах залегают темно- и светло-серые опоки нижнесызранской подсвиты со следами ожелезнения в виде светло- и темно-коричневых пятен, аналогичные силицитам, изученным ранее в разрезе Лысая гора [3], который располагается на 24 км восточнее (рис. 1, а).

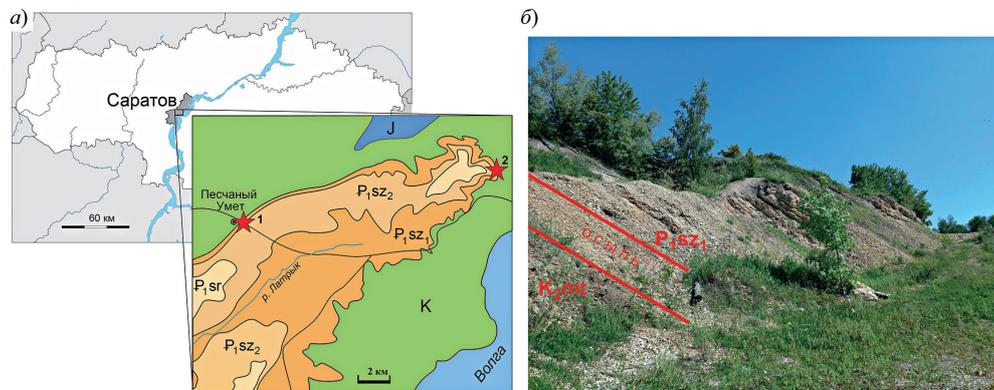


Рис. 1. Обзорная и геологическая схемы (а), общий вид на разрез Песчаный Умет (б). Звездочками показаны местоположения разрезов сызранской свиты, изученных в палеомагнитном отношении на территории г. Саратова: 1 – Песчаный Умет (настоящая работа), 2 – Лысая гора [3]. J – юра, K – мел, P₁sz₁ и P₁sz₂ – нижнесызранская и верхнесызранская подсвиты соответственно, P₁sr – саратовская свита

2. Методика проведения работ

В разрезе с помощью шанцевого инструмента взяты ориентированные штUFFы с 29 уровней, с интервалом в основном 0.9 м (рис. 2). Отбор начат примерно в метре выше подошвы сызранской свиты, так как пограничный интервал маа-

стрихта – палеоцена покрыт в карьере мощной осыпью (рис. 1, б). Каждый штупф распиливался на 2–3 образца кубической формы с ребрами 2 см.

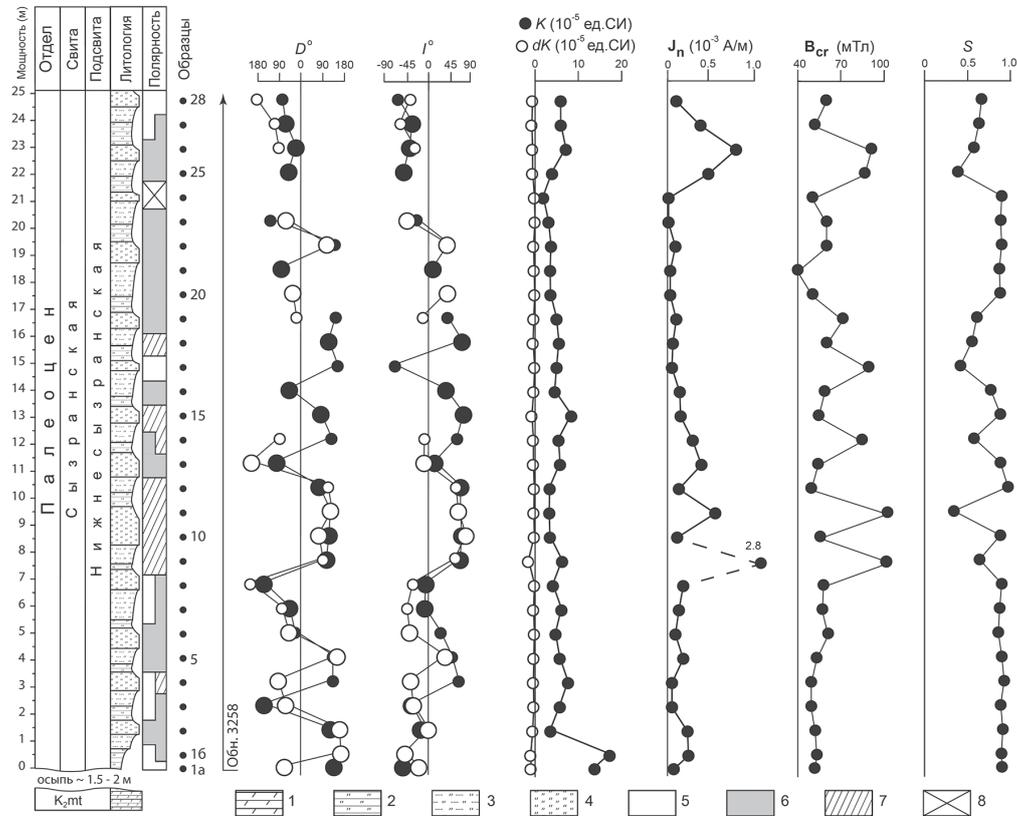


Рис. 2. Магнитостратиграфический разрез нижнесызранской подсвиты Песчаный Умет. Черные и белые маркеры на графиках палеомагнитного склонения (D) и наклона (I) означают, что компоненты намагниченности выделены в результате размагничивания переменным магнитным полем и температурой соответственно. Более крупные маркеры соответствуют $ChRM$. 1 – глины карбонатные; 2 – глины кремнистые; 3 – опоки глинистые; 4 – опоки; 5, 6 – обратная и аномальная полярность соответственно; 7 – компоненты J_n , совпадают с направлением перемагничивания современным полем; 8 – полярность не определена (компоненты J_n не выделены)

У образцов измеряли объемную магнитную восприимчивость (K) и ее анизотропию (AMB) до и после прогрева при температуре $500\text{ }^\circ\text{C}$ в течение часа (прирост $dK = K_t - K$, где K_t (термокаппа) – это магнитная восприимчивость, измеренная после нагрева, которая зачастую отражает содержание тонкодисперсного (невидимого визуально) пирита благодаря фазовому переходу FeS_2 в магнетит при температуре свыше $400\text{ }^\circ\text{C}$ [7]), а также естественную остаточную намагниченность (J_n). По результатам магнитного насыщения определяли поля остаточной коэрцитивной силы (B_{cr}), рассчитывали параметр S по уравнению 1.

$$S = -J_{r(-300)} / J_{rs}, \quad (1)$$

где $J_{r(-300)}$ – остаточная намагниченность после воздействия полем 300 мТл , обратным полем насыщения, а J_{rs} – намагниченность после воздействия полем 700 мТл (максимальная интенсивность поля, создаваемая лабораторным элек-

тромагнитом). Выборочные образцы подвергались термомагнитному анализу (ТМА) – изучению температурных зависимостей намагниченности.

Палеомагнитные исследования выполнялись по стандартной методике [7], заключающейся в измерениях J_n образцов после их последовательного размагничивания переменным полем (от 2–5 мТл до 30–50 мТл с шагом 2–5 мТл) или температурой (от 100 до 200–250 °С с шагом 25–50 °С). Прекращение нагревов свыше 250 °С обусловлено потерей величин J_n до значений ниже пороговой чувствительности прибора. Фазовые превращения минералов в процессе термочисток контролировались измерениями K -образцов после каждого нагрева.

Замеры магнитной восприимчивости и АМВ проводились на каппабридже МФК1-ФВ, остаточной намагниченности – на спин-магнитометре JR-6, для размагничивания переменным полем использовалась установка LDA-3AF (все приборы – AGICO, Чешская Республика). Магнитные чистки температурой проводились в печи конструкции В.П. Апарина с пятислойными пермаллоевыми экранами. Для магнитного насыщения был задействован регулируемый электромагнит с максимальной интенсивностью поля 700 мТл, изготовленный в Институте физики Саратовского государственного университета (Россия). ТМА проводился на термоанализаторе фракций ТАФ-2 (ООО «Орион», Россия). При термокаппаметрических исследованиях нагревы проводились в муфельных печах СНОЛ-6/11-В (SNOL, Россия). Анализ данных АМВ проводился с помощью программ Anisoft 4.2, компонентный анализ палеомагнитных данных выполнялся в программе Remasoft 3.0.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Магнитная минералогия и петромагнетизм. Изученные отложения слабомагнитны: K и J_n варьируют от 0.8 до $16 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ и от 0.03 до $2.8 \cdot 10^{-3}$ А/м соответственно (рис. 2).

По параметрам магнитного насыщения исследуемые образцы четко обособляются на три группы (рис. 3, а). В группе I насыщение происходит в полях от 200–300 мТл (рис. 3, б), разрушение – при 40–60 мТл, а значения параметра $S > 0.85$. Подобная магнитомягкая фаза характерна для тонкодисперсного магнетита. Для немногочисленной группы II характерны V_{cr} около 60 мТл и вариации S от 0.55 до 0.85. Образцам группы III свойственны V_{cr} от 85 до 104 мТл и S от 0.34 до 0.64. В группах II и III магнитное насыщение при 700 мТл не достигается (рис. 3, в). В группе I доминируют сероцветные породы, а в группы II и III входят образцы со следами ожелезнения (с наиболее интенсивными в образцах из группы III), поэтому повышение магнитной жесткости образцов из групп II и III однозначно связывается с гидроокислами железа. Последние как продукты окисления других минералов являются носителями химической намагниченности, которая характеризуется лучшей упорядоченностью магнитных моментов частиц. Этим объясняется значимая (на уровне $p = 0.01$) положительная корреляция между V_{cr} и J_n в разрезе (рис. 2).

Термокаппаметрические данные не фиксируют наличия пирита ($dK \leq 0$) (рис. 2), что не исключает, однако, его наличия в исходном осадке. Возможно, значительная часть гидроокислов железа в исследуемых образцах является продуктом окисления FeS_2 , а не магнетита.

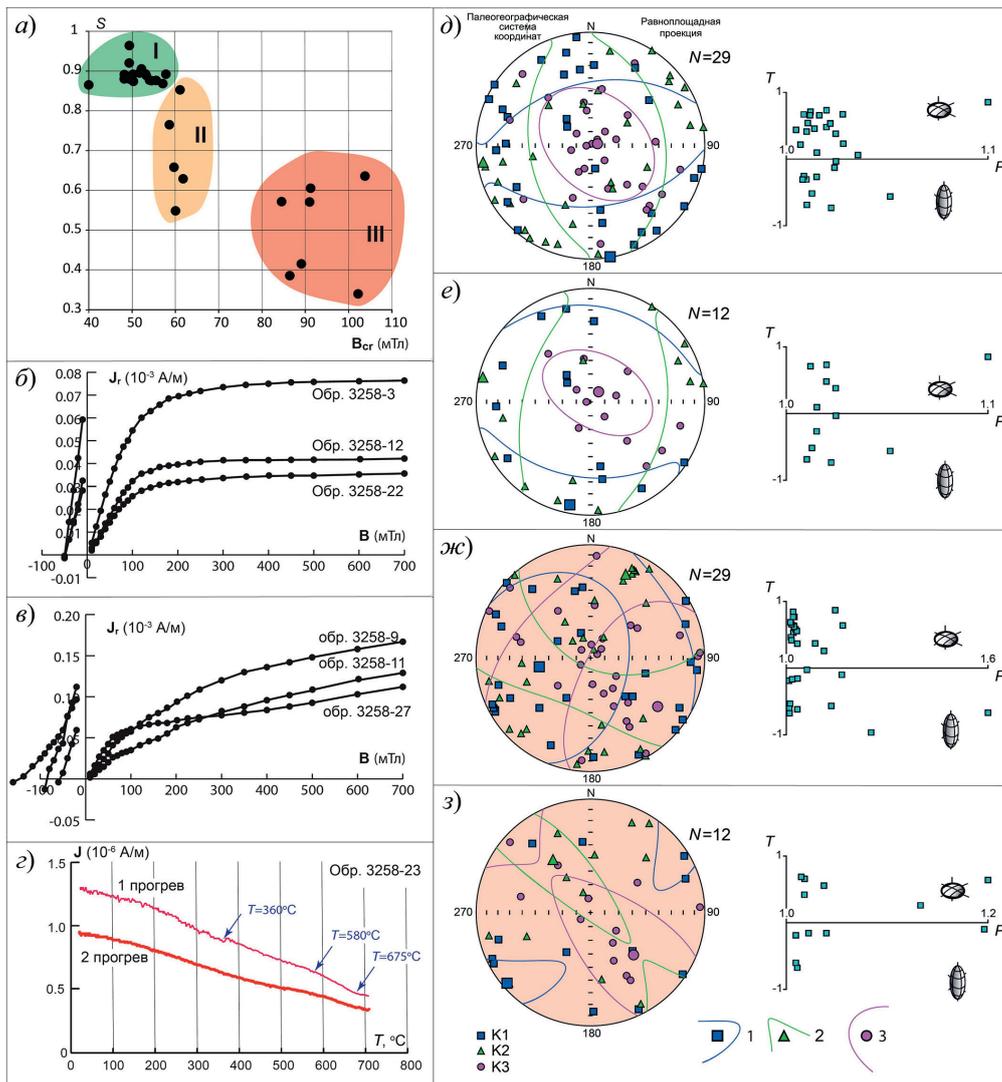


Рис. 3. Результаты магнито-минералогических исследований: а) разделение всех образцов на три группы (римские цифры) по диаграмме $B_{cr} - S$; б) и в) типичные кривые магнитного насыщения и разрушения для образцов из группы I и групп II, III (согласно а) соответственно; г) типичная кривая ТМА; д-з) стереопроекции осей эллипсоидов магнитной восприимчивости (в проекции на нижнюю полусферу) в палеогеографической системе координат и диаграммы Желинека до (д и е) и после прогрева пород (ж и з) по всем изученным образцам (д и ж) и магнито жестким образцам из групп II, III (е и з). N – число образцов

Кривые ТМА невыразительны (рис. 3, г), очевидно, из-за малых концентраций ферромагнетиков. Но, по крайней мере, рост намагниченности после 400° C на них не наблюдается, что согласуется с термокаппаметрическими данными об отсутствии пирита в образцах. Мало заметные перегибы вблизи 578° C не исключают наличия тонкодисперсного магнетита. Гематит, фиксируемый по перегибу в районе 675° C, вероятно, является продуктом окисления в процессе нагрева магнетита или/и маггемита, образующегося при диссоциации лепидокрокита после 250° C [8].

Изучение АМВ-образцов показало, что форма магнитных частиц близка к изометричной (параметр анизотропии P в основном менее 1.2) при преобладании частиц уплощенной формы (рис. 3, в). Скорее всего, доминирование уплощенных форм связано с глинистыми и слюдястыми минералами, на плоскостях которых агрегируется тонкодисперсный магнетит [9].

На первый взгляд, в разрезе наблюдается хаотичное распределение осей магнитных эллипсоидов на стереограммах (рис. 3, д), которое принципиально не изменяется после исключения из выборки магнитомягких образцов (рис. 3, е). После прогрева образцов до 500 °С магнитная текстура становится закономерной и типичной для пород, испытавших тектоническую деформацию: среднее положение коротких осей (К3) отклоняется от вертикального по азимуту падения пластов к ЮВ (рис. 3, ж). После исключения из выборки магнитомягких образцов эта закономерность проявляется более выразительно: проекции К3 при сохранении того же наклона осей явственно расположены вдоль линии, соответствующей азимуту падения пластов (СЗ–ЮВ), а длинные оси (К1) хорошо упорядочены по перпендикулярному к ней направлению (ЮЗ–СВ) (рис. 3, з). Заметное улучшение магнитной текстуры после прогрева наблюдалось ранее при исследованиях разновозрастных отложений разреза Лысая гора [3]. Возможно, этот эффект связан с выгоранием парамагнитных минералов, ассоциирующих с глинистыми частицами.

Поскольку «тектоническая» текстура наиболее отчетливо проявлена в магнито жесткой выборке, следует заключить, что форма магнитных частиц в этих образцах не менялась после наклона слоев, а в магнитомягких образцах, напротив, изменилась (например, из-за неравномерности окисления). Можно предположить, что значительная доля гидроокислов железа в магнито жестких группах возникла за счет легкоокисляемого пирита еще на стадии диагенеза.

3.2. Палеомагнетизм. Палеомагнитным исследованиям подверглись 58 ориентированных образцов (по два образца с каждого из 29 уровней, один из которых размагничивался переменным полем, другой – температурой). Компоненты намагниченности с максимальными углами отклонения ($MUO < 15-16^\circ$) удалось выделить в 42 образцах. Среди выделенных компонент J_n нет идущих строго в начало координат, но, когда точки на диаграммах Зийдервельда «двигались» к нему, «нулевая» точка включалась в расчет характеристической компоненты (**ChRM**). Результаты разных видов магнитных чисток согласуются между собой (рис. 4) или, по крайней мере, не противоречат друг другу. Так, ситуация не считалась противоречивой, если совпадающая с направлением перемагничивания современным полем компонента J_n , сохранялась после чистки переменным полем, но разрушалась (по крайней мере, частично) при терморазмагничивании (рис. 2, обр. 4, 14). Имеющие место расхождения между аномальными направлениями в образцах-дублях на уровнях 13 и 19, скорее всего, также обусловлены разной степенью разрушения вторичной J_n вследствие неравномерной концентрации гидроокислов железа, наблюдаемой визуально.

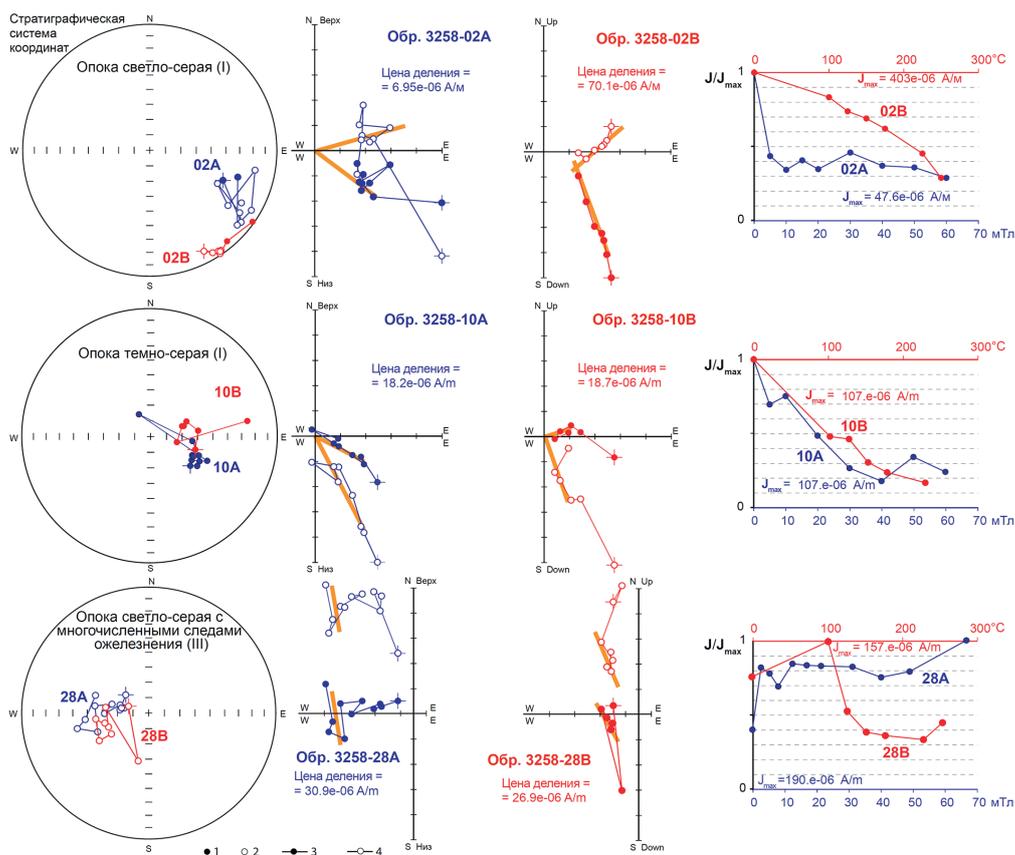


Рис. 4. Результаты компонентного анализа (в стратиграфической системе координат): стереопроекции с изображениями изменений векторов \mathbf{J}_n в процессе магнитных чисток; диаграммы Зийдервельда и графики размагничивания образцов. Проекция \mathbf{J}_n на нижнюю (1) и верхнюю (2) полусферы, горизонтальную (3) и вертикальную (4) плоскости. Красный и синий цвет – результаты размагничивания температурой и переменным магнитным полем соответственно. Римскими цифрами рядом с названием породы указан номер группы по параметрам магнитного насыщения.

Проекция компонент \mathbf{J}_n в исследуемом разрезе распределены по сфере хаотично: кучности равны примерно единице в обеих системах координат (рис. 5, а). Аналогичная картина наблюдалась в ранее изученных нижнесызранских породах разреза Лысая гора (рис. 5, б-1) [4]. В хаотичном распределении компонент \mathbf{J}_n на сфере заключается кардинальное отличие палеомагнитных характеристик разрезов, расположенных на территории Саратова, от их возрастных аналогов на юге Саратовского Правобережья, которым свойственны доминирующая прямая полярность и высокая кучность направлений (рис. 5, б-2) [4].

Большинство компонент \mathbf{J}_n в разрезе Песчаный Умет имеют аномальные направления, некоторые соответствуют обратной полярности поля. Несколько компонент статистически совпадают с направлением перемагничивания современным полем. Компонент, близких к направлению, соответствующему прямой полярности палеоценового поля, отличающихся от него хотя бы менее чем на 45° , в изученных образцах не обнаружено (рис. 5, а-1, а-2). Проекция больш-

шинства компонент \mathbf{J}_n располагаются вдоль кругов перемагничивания, образуемых векторами современного поля и палеоценового поля обратной полярности (рис. 5, *a-1*, *a-2*). Направление палеоценового поля для территории Саратова пересчитано из положения полюса 65 млн лет для стабильной Европы [10]. Наблюдаемая тенденция становится более очевидной, если исключить из рассмотрения компоненты с $\text{МУО} > 10^\circ$ (рис. 5, *a-3*, *a-4*).

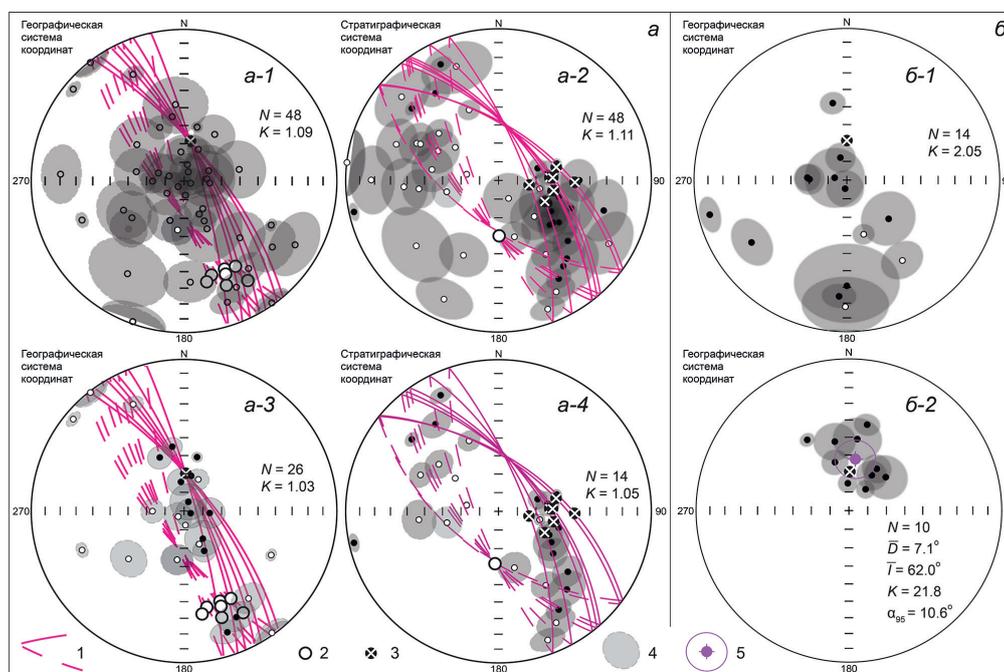


Рис. 5. Стереопроекции компонент \mathbf{J}_n : *a*) по разрезу Песчаный Умет (все компоненты (*a-1*, *a-2*) и те, у которых $\text{МУО} < 10^\circ$ (*a-3*, *a-4*), в географической (*a-1*, *a-3*) и стратиграфической (*a-2*, *a-4*) системах координат); *б*) по разрезам Лысая гора (*б-1*) и Сырт (*б-2*) в географической системе координат [3]. 1 – круги перемагничивания; 2, 3 – проекции векторов современного поля и палеоценового поля обратной полярности соответственно; 4 – МУО для компонент \mathbf{J}_n ; 5 – среднее палеомагнитное направление (\bar{D} – склонение, \bar{I} – наклонение) и круг доверия (α_{95}) для него, N – число образцов, K – межпластовая кучность. Остальные условные обозначения см. на рис. 4.

В работе [3] авторы обоснованно предположили, что намагниченность сызранской свиты является стабилизированной векторной суммой двух компонент: первичной, связанной с магнетитом, и вторичной, обусловленной гидроксидами железа – продуктами окисления магнетитовых и/или пиритовых зерен. Если компоненты антипараллельны, то даже незначительное разрушение одной из них приведет к существенному изменению векторной суммы. Следствием этого будут большие внутрипластовые и межпластовые разбросы результирующих компонент, а также расположение их проекций вдоль кругов перемагничивания. Поэтому в работе [3] интервал с подобными палеомагнитными свойствами в разрезе Лысая гора предварительно был интерпретирован как магнитозона преимущественно обратной полярности. Данные по разрезу Песчаный Умет подтверждают правомерность этого вывода. Интервал с аномальными направлениями компонент \mathbf{J}_n латерально устойчив и прослеживается на расстоянии ~ 25 км в

разрезах, находящихся в разных геологических условиях. Песчаный Умет расположен на крыле антиклинали, где пласты падают под углами 30–48°, на Лысой горе залегание слоев субгоризонтальное.

Отличия в палеомагнитном облике нижнесызранской подсвиты на юге Саратовской области и территории г. Саратова легко истолковать с точки зрения разновозрастности отложений, предположив, что низы и верхи подсвиты формировались в эпохи прямого и обратного режимов полярности соответственно. Поэтому, несмотря на низкое качество палеомагнитных данных, мы считаем, что разрезы Песчаный Умет и Лысая гора охвачены магнитозонами обратной (или преимущественно обратной) полярности. Благодаря сравнительно простой палеомагнитной структуре палеоцена, идентификация этой зоны с хроном C27 или/и C26 (вторая половина датского века – зеландский век), в которых доминирует обратная полярность, не вызывает затруднений. Преобладание режима прямой полярности характерно только для первой половины датского века (хроны C29 – C28) (рис. 6).

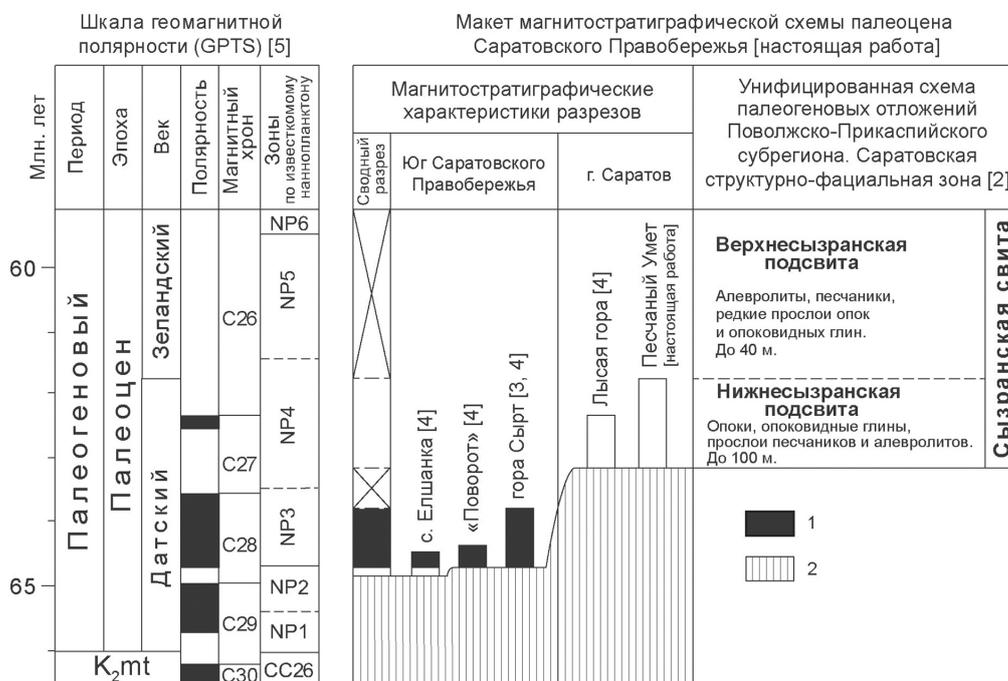


Рис. 6. Предварительная версия магнитостратиграфической схемы палеоцена Саратовского Правобережья и ее сопоставление с GPTS. 1 – прямая полярность, 2 – отсутствие отложений. Остальные условные обозначения см. на рис. 2.

Заключение

Данные по разрезу Песчаный Умет стали ключевыми для обоснования палеомагнитного строения нижнесызранской подсвиты. Подсвита характеризуется как минимум двумя магнитозонами: нижней (N_P) – прямой (или преимущественно прямой) и верхней (R_P) – обратной (или преимущественно обратной) полярности. N_P прослежена в трех разрезах на юге Саратовского Правобережья, а R_P – в двух разрезах на территории г. Саратова. Обобщение материалов позволило предложить первую версию магнитостратиграфической схемы палео-

цена Поволжья (рис. б) и провести на ее основе детальную корреляцию разрезов сызранской свиты, из которой следует, что низы свиты на территории Саратова моложе, чем на юге области, примерно на 1.5 млн лет. Сопоставление с GPTS указывает на возраст сызранской свиты на территории г. Саратова не древнее середины датского века. Продолжение палеомагнитного изучения палеоцена Поволжья откроет новые возможности региональных и межрегиональных корреляций, затрудненных в связи с недостаточностью палеонтологических данных.

Благодарности. Авторы благодарны Е.М. Первушину (СГУ) за ознакомление с разрезом, Р.С. Дакирову (СГУ) за помощь в полевых и лабораторных работах.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-27-00159, <https://rscf.ru/project/23-27-00159/>.

Литература

1. Мусатов В.А., Музылев Н.Г., Ступин С.И. Палеоценовые отложения Поволжья и Северного Прикаспия: новые данные, событийный подход // Вопросы стратиграфии фанерозоя Поволжья и Прикаспия: сборник научных трудов / под ред. А.В. Иванова, В.А. Мусатова. Саратов: Изд-во Саратов. гос. ун-та, 2004. С. 226–258.
2. Ахметьев М.А., Шик С.М., Алексеев А.С. Унифицированная стратиграфическая схема палеогеновых отложений Поволжско-Прикаспийского субрегиона. Объяснительная записка. М.: ВНИГНИ, 2014. 96 с.
3. Шелепов Д.А., Гужиков А.Ю. Результаты рекогносцировочных магнитостратиграфических исследований палеоцена в южной части Саратовского Правобережья // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 117–131. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-2-117-131>.
4. Шелепов Д.А., Гужиков А.Ю., Рябов И.П., Первушов Е.М. Магнитостратиграфия пограничного интервала мела – палеогена юга Саратовского Правобережья // Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: материалы XI Всероссийского совещания (Томск, 19–24 сентября 2022 г.). Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2022. С. 285–288.
5. Geologic Time Scale 2020 / Ed. by F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.B. Schmitz, G.M. Ogg. Oxford: Elsevier, 2020. 1390 p.
6. Шебалдин В.П. Тектоника Саратовской области. Саратов: ОАО «Саратовнефтегеофизика», 2008. 44 с.
7. Молостовский Э.А., Храмов А.Н. Магнитостратиграфия и ее значение в геологии. Саратов: Изд-во Саратов. гос. ун-та, 1997. 180 с.
8. Gendler T.S., Shcherbakov V.P., Dekkers M.J., Gapeev A.K., Gribov S.K., McClelland E. The lepidocrocite–maghemite–haematite reaction chain—I. Acquisition of chemical remanent magnetization by maghemite, its magnetic properties and thermal stability // Geophys. J. Int. 2005. V. 160, No 3. P. 815–832. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02550.x>.
9. Grishchenko V.A., Guzhikov A.Yu. Paleomagnetic directions distortion caused by viscous-plastic deformations estimated from anisotropy of magnetic susceptibility (case study of Berriasian clays from East Crimea) // Recent Advances in Rock Magnetism, Environmental Magnetism and Paleomagnetism / Ed. by D. Nurgaliev, V. Shcherbakov, A. Kosterov, S. Spassov. Ser.: Springer Geophysics. Cham: Springer, 2019. P. 25–35. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90437-5_3.

10. Besse J., Courtillot V. Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2002. V. 107, No 11. P. EPM 6-1–EPM 6-31. <https://doi.org/10.1029/2000JB000050>.

Поступила в редакцию 04.09.2023

Принята к публикации 02.10.2023

Шелепов Дмитрий Александрович, старший преподаватель кафедры петрологии и прикладной геологии

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

ул. Астраханская, д. 83, г. Саратов, 410012, Россия

E-mail: shelepov-dmitriy@mail.ru

Гужиков Андрей Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой общей геологии и полезных ископаемых

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

ул. Астраханская, д. 83, г. Саратов, 410012, Россия

E-mail: aguzhikov@yandex.ru

ISSN 2542-064X (Print)

ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2023, vol. 165, no. 4, pp. 524–536

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.524-536

Results of the Magnetostratigraphic Studies of the Syzran Formation (Paleocene) in the Peschanyi Umyot Section (Saratov, Russia)

D.A. Shelepov, A.Yu. Guzhikov***

Saratov State University, Saratov, 410012 Russia

E-mail: **shelepov-dmitriy@mail.ru, **aguzhikov@yandex.ru*

Received August 29, 2023; Accepted October 2, 2023

Abstract

In this article, the results of the rock-magnetic measurements (magnetic susceptibility and its anisotropy before and after the heating of rocks, magnetic saturation) and paleomagnetic studies of the Lower Syzran Subformation (Paleocene) in the Peschanyi Umyot section (Saratov, Russia) are discussed. The section is composed of weakly magnetic silicites and has the paleomagnetic parameters that are suitable for magnetostratigraphic purposes. The presence of a magnetic zone with predominantly reverse polarity, which is an analogue of either chron C27 or C26 or their combination, was found in the section. The results obtained, along with previously collected data from coeval sections in the south of the Saratov right bank and the city of Saratov, made it possible to draft a magnetostratigraphic chart for the Paleocene of the Volga region, provide a detailed correlation of the Syzran Formation, estimate the duration of the pre-Paleogene erosion, and more accurately date the age of deposits.

Keywords: magnetostratigraphy, rock magnetism, Paleocene, Danian, Syzran Formation, Lower Volga region

Acknowledgements. We thank E.M. Pervushov (Saratov State University) for sharing with us the data on the section and R.S. Dakirov (Saratov State University) for his assistance in the field and laboratory work.

The study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-27-00159, <https://rscf.ru/project/23-27-00159/>).

Figure Captions

- Fig. 1. Overview and geological maps (a) and a general view of the Peschanyi Umyot section (b). The asterisks show the locations of the sections in the Syzran Formation examined in the paleomagnetic study of the city of Saratov: 1 – Peschanyi Umyot [this work], 2 – Lysaya Gora [3]. J – Jurassic, K – Cretaceous, P_{sz_1} и P_{sz_2} – Lower Syzran Subformation and Upper Syzran Subformation, respectively, P_{sr} – Saratov Formation.
- Fig. 2. Magnetostratigraphic section of the Lower Syzran Subformation in the Peschanyi Umet section. Black and white markers on the plots of paleomagnetic declination (D) and inclination (I) show that the magnetization components are isolated as a result of the demagnetization by an alternating magnetic field and temperature, respectively. Larger markers correspond to **ChRM**. 1 – carbonate clays; 2 – siliceous clays; 3 – clay flasks; 4 – flasks; 5, 6 – reverse and anomalous polarity, respectively; 7 – J_n components, coincide with the direction of magnetization reversal by a modern field; 8 – polarity unknown (J_n components are not highlighted).
- Fig. 3. Results of the magneto-mineralogical studies: a) division of all samples into three groups (Roman numerals) according to the $B_{cr} - S$ diagram; b and c) curves of magnetic saturation and destruction for the samples from group I and groups II, III (according section a), respectively; d) TMA curve; e–h) the stereo projections of the axes of the magnetic susceptibility ellipsoids (in the projection onto the lower hemisphere) in the paleogeographic coordinate system and the Jelinek diagram before (e and f) and after the heating of rocks (g and h) for all studied samples (e and g) and the magnetically hard samples from groups II, III (f and h). N – number of samples.
- Fig. 4. Results of the component analysis (in the stratigraphic coordinate system): stereo projections with the images of changes in the J_n vectors during demagnetization; Zijderveld diagrams and sample demagnetization plots. Projections of J_n onto the lower (1) and upper (2) hemispheres, horizontal (3) and vertical (4) planes. Red and blue colors are the results of demagnetization by temperature and alternating magnetic field, respectively. Roman numerals next to the rock name indicate the group number according to the parameters of magnetic saturation.
- Fig. 5. Stereo projections of the J_n components: a) along the Peschanyi Umyot section (all components (a-1, a-2) and those with $MAD < 10^\circ$ (a-3, a-4) in the geographic (a-1, a-3) and stratigraphic (a-2, a-4) coordinate systems); b) along the Lysaya Gora (b-1) and Syrt (b-2) sections in the geographic coordinate systems [3]. 1 – magnetization reversal circles; 2, 3 – projections of the vectors of a modern field and the Paleocene field of reverse polarity, respectively; 4 – MAD for the J_n components; 5 – average paleomagnetic direction (D – declination, I – inclination) and confidence circle (α_{95}) for it, N – number of samples, K – paleomagnetic precision parameter. For other symbols, see Fig. 4.
- Fig. 6. Preliminary magnetostratigraphic chart of the Paleocene of the Saratov right bank and its comparison with the GPTS. 1 – normal polarity, 2 – no deposits. For other symbols, see Fig. 2.

References

1. Musatov V.A., Muzylev N.G., Stupin S.I. Paleocene deposits of the Volga and Northern Caspian regions: New data, event-based approach. In: Ivanov A.V., Musatov V.A. (Eds). *Voprosy stratigrafii Povolzh'ya i Prikaspiya* [Stratigraphic Problems of the Volga and Caspian Regions]. Saratov, Sarat. Gos. Univ., 2004. pp. 226–258. (In Russian)
2. Akhmet'ev M.A., Shik S.M., Alekseev A.S. *Unifitsirovannaya stratigraficheskaya skhema paleogenovykh otlozhenii Povolzhsko-Prikaspiiskogo subregiona. Poyasnitel'naya zapiska* [Unified Stratigraphic Chart of the Paleogene Deposits of the Volga-Caspian Subregion. Explanatory Note]. Moscow, VNIGNI, 2014. 96 p. (In Russian)
3. Shelepov D.A., Guzhikov A.Yu. Results of the reconnaissance magnetostratigraphic studies of Paleocene in the southern part of the Saratov right bank. *Izv. Sarat. Univ. Nov. Ser. Ser.: Nauki Zemle*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 117–131. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-2-117-131>. (In Russian)

4. Shelepov D.A., Guzhikov A.Yu., Ryabov I.P., Pervushov E.M. Magnetostratigraphy of the Cretaceous–Paleogene boundary interval in the south of the Saratov right bank. *Melovaya sistema Rossii i blizhnego zarubezh'ya: problemy stratigrafii i paleogeografii: materialy XI Vserossiiskogo soveshchaniya (Tomsk, 19–24 sentyabrya 2022 g.)* [Cretaceous System of Russia and CIS Countries: Problems of Stratigraphy and Paleogeography: Proc. XI All-Russian Conf. (Tomsk, September 19–24, 2022)]. Tomsk, Tomsk. Gos. Univ., 2022. pp. 285–288. (In Russian)
5. Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.B., Ogg G.M. (Eds.) *Geologic Time Scale 2020*. Oxford, Elsevier, 2020. 1390 p.
6. Shebal'din V.P. *Tektonika Saratovskoi oblasti* [Tectonics of the Saratov Region]. Saratov, OAO “Saratovneftegeofizika”, 2008. 44 p. (In Russian)
7. Molostovskii E.A., Khramov A.N. *Magnitostratigrafiya i ee znachenie v geologii* [Magnetostratigraphy and Its Significance for Geology]. Saratov, Izd. Sarat. Gos. Univ., 1997. 180 p. (In Russian)
8. Gendler T.S., Shcherbakov V.P., Dekkers M.J., Gapeev A.K., Gribov S.K., McClelland E. The lepidocrocite–maghemite–haematite reaction chain—I. Acquisition of chemical remanent magnetization by maghemite, its magnetic properties and thermal stability. *Geophys. J. Int.*, 2005, vol. 160, no. 3, pp. 815–832. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02550.x>.
9. Grishchenko V.A., Guzhikov A.Yu. Paleomagnetic directions distortion caused by viscous-plastic deformations estimated from anisotropy of magnetic susceptibility (case study of Berriasian clays from East Crimea). In: Nurgaliev D., Shcherbakov V., Kosterov A., Spassov S. (Eds). *Recent Advances in Rock Magnetism, Environmental Magnetism and Paleomagnetism*. Ser.: Springer Geophysics. Cham, Springer, 2019, pp. 25–35. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90437-5_3.
10. Besse J., Courtillot V. Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2002. vol. 107, no. B11, pp. EPM 6-1–EPM 6-31. <https://doi.org/10.1029/2000JB000050>.

⟨ **Для цитирования:** Шелепов Д.А., Гужиков А.Ю. Результаты магнитостратиграфических исследований сызранской свиты (палеоцен) разреза Песчаный Умет (г. Саратов) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 524–536. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.524-536>. ⟩

⟨ **For citation:** Shelepov D.A., Guzhikov A.Yu. Results of the magnetostratigraphic studies of the Syzran Formation (Paleocene) in the Peschanyi Umyot section (Saratov, Russia). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 524–536. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.524-536>. (In Russian) ⟩

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.384

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.537-549

**ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ ВЕЛИКОЙ ДАЙКИ КОЛЬСКОГО
ПОЛУОСТРОВА (2.68 МЛРД ЛЕТ): НОВЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА
УЛЬТРАНИЗКОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ЗЕМЛИ В ПОЗДНЕМ АРХЕЕ**

*В.В. Щербак¹, Р.В. Веселовский^{2,3}, Г.В. Жидков¹, Н.А. Афиногенова¹,
А.В. Самсонов⁴, А.В. Степанова⁵, М.А. Смирнов¹*

¹ГО «Борок» ИФЗ РАН, Борок, 152742, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия

³Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия

⁴Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии
и геохимии РАН, Москва, 119017, Россия

⁵Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск, 185910, Россия

Аннотация

Гигантские дайки основных пород маркируют ключевые этапы эволюции Земли в докембрии и являются предметом всесторонних исследований. В статье представлены результаты палеомагнитных и петромагнитных исследований и определения палеонапряженности $B_{др}$, полученные по коллекции образцов Великой дайки Кольского полуострова возрастом 2.68 млрд лет. Вычисленные по 5 сайтам (41 образец) среднее палеомагнитное направление характеристической компоненты намагниченности и палеомагнитный полюс Мурманского кратона составляют $D = 117.6^\circ$, $I = 77.1^\circ$, $K = 40.9$, $\alpha_{95} = 12.1^\circ$, $slat = 69.265^\circ$, $slong = 34.35447^\circ$, $plat = 51.5^\circ$, $plong = 70.7^\circ$, $dp/dm = 21.1^\circ/22.6^\circ$, $paleolat = 65^\circ$. Подробно изучены терромагнитные свойства пород и показано, что носителями остаточной намагниченности являются однодоменные и малые псевдооднодоменные (группа А) или многодоменные (группа Б) частицы магнетита. Оценка палеонапряженности по 12 образцам из группы А методом Телье-Коэ составляет $B_{др} = (6.16 \pm 0.92)$ мкТл, а соответствующее среднее значение виртуального дипольного момента $VDM_{2.68Ga} = (0.85 \pm 0.13) \times 10^{22}$ Ам². Новые данные согласуются с результатами исследований других объектов архейского и протерозойского возраста и указывают на крайне слабое по величине магнитное поле Земли в позднем архее.

Ключевые слова: архей, Великая дайка Кольского полуострова, палеомагнитный полюс, палеонапряженность, метод Телье-Коэ.

Введение

Сведения о величине и направлении магнитного поля Земли являются ключевыми для понимания этапов ее эволюции, а также процессов, происходящих в земном ядре. Палеомагнитные данные для докембрия относительно немногочисленны, что нередко связано с неудовлетворительной сохранностью первичной магнитной записи в геологических объектах, возраст которых составляет первые миллиарды лет. По этой причине вопросы о времени возникновения у Зем-

ли магнитного поля и его последующей эволюции остаются дискуссионными. В частности, имеющиеся надежные палеомагнитные данные свидетельствуют о на порядок более низкой, чем сейчас, напряженности геомагнитного поля в докембрии. В этой связи результаты комплексных геохронологических, петрологических, геохимических и палеомагнитных исследований докембрийских пород имеют практическую значимость, поскольку могут быть использованы, например, для изучения эволюции магнитного геодинамо и построения палеотектонических реконструкций.

Крупные магматические провинции (КМП) континентов являются наиболее перспективными объектами для получения данных о прошлом Земли, поскольку эпизоды их формирования соответствуют глобальным тектоническим событиям, таким как распад суперконтинентов. Дайковые рои, включающие в себя также и крупные (гигантские) дайки, рассматриваются как подводящие каналы для вулканических центров в пределах КМП и несут в себе информацию об условиях их формирования и эволюции. Основным состав даек определяет их как потенциальный объект для проведения палеомагнитных исследований, главной задачей которых является оценка возраста компонент естественной остаточной намагниченности (*NRM*) и вычисление направления и величины (полного вектора) геомагнитного поля во время формирования намагниченности.

В пределах северной части Кольского полуострова, представляющей собой выход на дневную поверхность Мурманского кратона – блока архей-протерозойского фундамента Восточно-Европейской платформы, широкое распространение имеют дайковые рои, возраст которых находится в интервале от неоархея до девона. Благодаря хорошей обнаженности и сохранности субвулканические интрузивные тела Кольского полуострова в последнее десятилетие активно изучаются комплексом методов. В этой статье представлены первые результаты палеомагнитных исследований и определения палеонапряженности крупной дайки, имеющей собственное название «Великая дайка Кольского полуострова».

1. Объект и методы исследований

Великая дайка Кольского полуострова (дайка Зарубихи) представляет собой крупное интрузивное тело северо-восточного простирания; протяженность дайки более 50 км, мощность – от 150 до 700 м. Возраст дайки составляет 2680 ± 6 млн лет (U-Pb ID-TIMS, бадделеит) [1]. Она сложена в разной степени амфиболитизированными равномернозернистыми и плагиоклаз-порфировыми долеритами и габбро [1]. Дайка была исследована в 2019 г. на побережье Баренцева моря, в бухте Медвежья, в точке с координатами (69.26503° с. ш.; 34.35447° в. д.). Для палеомагнитных исследований вкрест простирания дайки в 5 сайтах при помощи портативного бура было отобрано 46 образцов, ориентировка которых производилась магнитным компасом, поправка за местное склонение вводилась по модели IGRF-12.

Лабораторные исследования отобранной палеомагнитной коллекции проводились согласно современной методике с использованием приборной базы геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, ЦКП ИФЗ РАН [2] и ГО «Борок» ИФЗ РАН. Петромагнитные исследования включали в себя определение

параметров анизотропии магнитной восприимчивости, измерение температурной зависимости магнитной восприимчивости и намагниченности насыщения. Палеомагнитные исследования заключались в выполнении пошагового размагничивания образцов и их дублей температурой (до 700 °С) или переменным магнитным полем (до 130 мТл) до полного размагничивания, компонентном анализе *NRM* и вычислении среднего палеомагнитного направления и полюса при помощи приложения PMTools [3].

2. Результаты петро- и палеомагнитных исследований

Распределение осей эллипсоида анизотропии магнитной восприимчивости (АМВ) коррелирует с положением сайтов в пределах дайки (рис. 1, а). Для пород, слагающих внутреннюю ее часть (сайты 2, 3 и 4), характерным является ориентировка плоскости, содержащей максимальную (К1) и промежуточную (К2) оси эллипсоида АМВ (сайты 2 и 3), или оси К1 и минимальную (К3) (сайт 4), параллельно простиранию дайки. Это можно рассматривать как довод в пользу сохранности первичной магнитной текстуры и предполагать субгоризонтальное течение магмы в процессе формирования интрузии. В приконтактных частях (сайты 1 и 5) ось К1 ориентирована под значительным углом к плоскости дайки, что может являться, например, особенностями течения магмы вблизи контакта или следствием тектонических напряжений после внедрения дайки. Степень анизотропии (P_j) в среднем составляет 4%, достигая 13% в краевых частях интрузии (сайт 5).

Температурная зависимость магнитной восприимчивости свидетельствует о наличии в изученных образцах магнетита; кривые нагрева и охлаждения образцов в воздушной среде необратимы (рис. 1, б). Компонентный анализ *NRM* выявил наличие двух компонент (рис. 1, в и г): низкотемпературной – 20–180 °С (низкокоэрцитивной – 0–5 мТл), имеющей вязкую природу, и высокотемпературной – 320–580 °С (высококоэрцитивной – 14–110 мТл) характеристической (*ChRM*). Результаты размагничивания образцов температурой (рис. 1, в) и переменным магнитным полем (рис. 1, г) совпадают, однако разброс направлений *ChRM* по результатам чистки переменным полем больше, поэтому для вычисления среднего палеомагнитного направления на уровне сайтов (рис. 1, д) ($N = 5$ сайтов, $D = 117.6^\circ$, $I = 77.1^\circ$, $K = 40.9$, $\alpha_{95} = 12.1^\circ$) и соответствующего полюса использовались исключительно результаты температурной магнитной чистки. Полюс, наиболее вероятно, является виртуальным геомагнитным, поскольку нет уверенности в усреднении вековых вариаций в палеомагнитной записи изученных образцов; координаты полюса: $\text{slat} = 69.26503^\circ$, $\text{slong} = 34.35447^\circ$, $\text{plat} = 51.5^\circ$, $\text{plong} = 70.7^\circ$, $dp/dm = 21.1^\circ/22.6^\circ$, палеоширота места отбора образцов 65° .

3. Определение палеонапряженности

3.1. Метод. Эксперименты по определению палеонапряженности $B_{др}$ выполнены на 33 образцах с наиболее надежными определениями палеонаправлений. Неориентированные обрезки штупфов распиливались на кубики с ребром 1 см для процедуры Телье, остатки использовались для других экспериментов. Палеонапряженность $B_{др}$ определялась по методу Телье-Коэ [4, 5] с выполнением

процедуры чек-точек (*pTRM*-points) [6]. $B_{др}$ оценивалась в температурном интервале (T_1, T_2) (fit-интервале), максимально близком к тому, в котором выделялась *ChRM* при палеомагнитных исследованиях. Вся процедура определения палеонапряженности, проводимая в ГО «Борок», детально описана в работе [7].

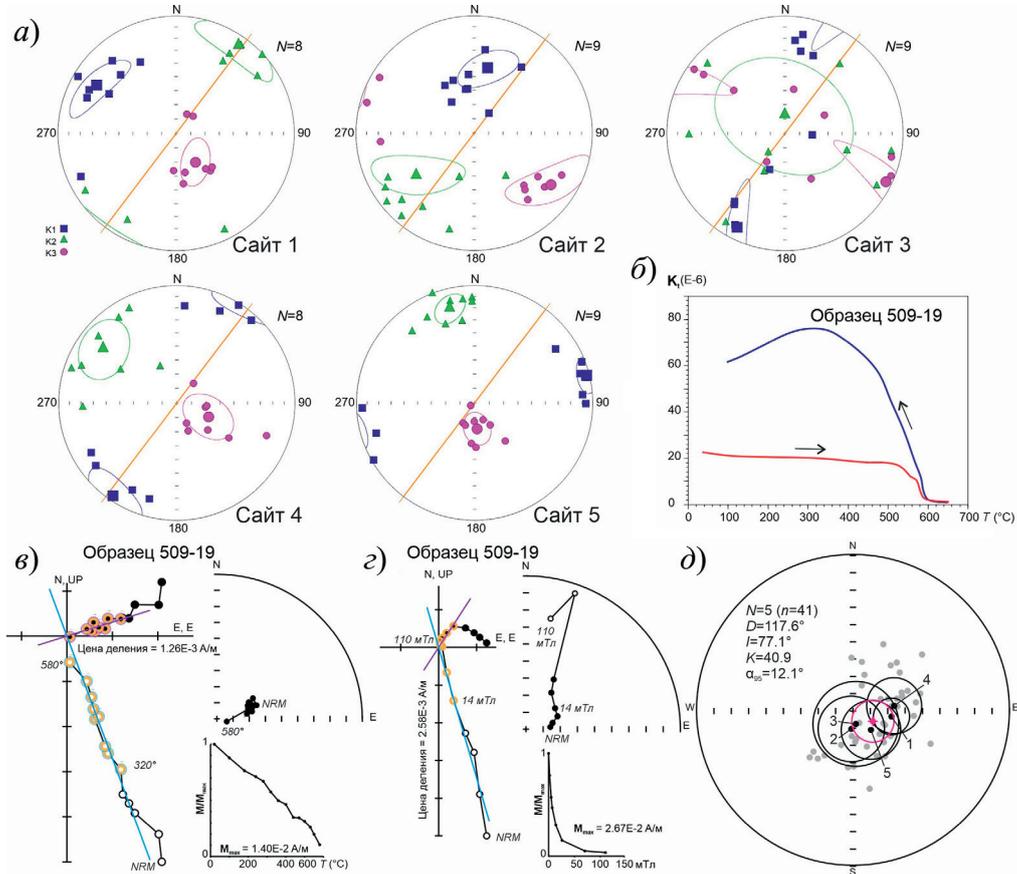


Рис. 1. Результаты петро- и палеомагнитных исследований: *а*) Анизотропия магнитной восприимчивости (проекция на нижнюю полусферу; K1, K2, K3 – оси эллипсоида АМВ: максимальная, промежуточная и минимальная соответственно; оранжевая линия соответствует простиранию дайки); *б*) температурная зависимость магнитной восприимчивости, обр. 509-19: красная кривая – нагрев, синяя – охлаждение; *в*) и *г*) результаты размагничивания обр. 509-19 температурой (*в*) и переменным магнитным полем (*г*): диаграмма Зийдervельда, стереограмма и график размагничивания. На диаграмме Зийдervельда черные (белые) точки – проекция вектора ЕОН на горизонтальную (вертикальную) плоскость; на стереограмме черные точки – проекция вектора ЕОН на нижнюю полусферу; *д*) стереограмма с единичными направлениями *ChRM* (серые точки), средними направлениями *ChRM* по сайтам (с кругами 95%-ного доверия) и среднее палеомагнитное направление (красная точка с кругом 95%-ного доверия). Номера соответствуют номерам сайтов. Система координат географическая

3.2. Магнитные и термомагнитные свойства пород и достоверность результатов. Породы коллекции по своим свойствам делятся на 2 группы – А (№ 499–512) и Б (№ 513–530). T_c образцов обеих групп лежат в интервале 560–590 °С, указывая на магнетит как носитель *NRM*. Рентгеноструктурные

исследования на магнитно-обогащенных образцах подтвердили значительное присутствие в них слабо окисленного магнетита наряду с рутилом, ильменитом и небольшим количеством гематита. Образцы стабильны к нагреву: кривые $M_{si}(T)$ (рис. 2, а, в) практически не меняются с ростом температуры вплоть до 590 °С, но различаются по своей форме. У образцов группы А они вогнутые, с преобладанием парамагнитной компоненты (рис. 2, а) в силу слабости $NRM \sim 10^{-5} - 10^{-6}$ ед. CGSM. У группы Б кривые M_{si} выпуклые, подобные M_s магнетита (рис. 2, в), NRM по величине заметно больше и составляет $\sim (10^{-3} - 10^{-4})$ ед. CGSM. Результаты рентгенофазового анализа состава не обнаруживают между ними регулярной разницы.

Основное различие в свойствах пород групп А и Б наблюдается в оценке доменной структуры (ДС) их магнитных зерен. На диаграмме Дзя (рис. 2, б) репрезентативные точки образцов группы А в основном находятся в ее левой части, в области, близкой к однодоменным (ОД) и малым псевдооднодоменным (ПОД) зернам (рис. 2, б). Для образцов группы Б точки находятся правее, в области более крупных ПОД зерен. Однако несколько образцов из группы А на этой диаграмме попадают в область крупных ПОД (№ 499, 510) и даже многодоменных (МД) (№ 502) зерен; и наоборот, несколько точек образцов группы Б находятся слева, вблизи группы А (№ 522, 523, 524).

Оценка ДС по термомагнитному (ТМ) критерию четко разделяет эти две группы образцов. Учитывая стабильность пород к нагревам, для выполнения ТМ критерия использовались уже гретые во время Телье-процедуры образцы. Кубики нагревались до T_c , при их охлаждении в нулевом поле в интервале $(T_2, T_1, T_2 > T_1)$ включалось лабораторное поле $B_{лаб}$ – создавалась $pTRM(T_2, T_1)$. Далее эта $pTRM$ размагничивалась (в нулевом поле образец грелся до T_2 и охлаждался до T_0), замерялся остаток («хвост $pTRM$ ») и вычислялось, какой процент составляет величина хвоста от значения полной $pTRM(T_2, T_1)$. Согласно ТМ критерию, $pTRM(T_2, T_1)$ при нагреве до T_2 и охлаждении до T_0 разрушается полностью у ОД зерен (остаток при T_0 – «хвост» < 5%), у ПОД зерен $5\% < \text{«хвост»} < 15\%$ и у МД зерен «хвост» > 15% [8].

Эта процедура выполнена на 5 из 14 образцов группы А и 4 из 18 образцов группы Б в двух температурных интервалах: fit-интервале (T_2, T_1) и низкотемпературном (НТ) интервале (T_1, T_0) . Температурные кривые описанных $pTRM(T)$ для образцов из одной и той же группы (А или Б) по своему виду абсолютно идентичны. Результаты применения ТМ критерия показаны на рис. 2, з, д для образца № 502 (группа А) и на рис. 2, е, ж – для образца № 526 (группа Б). Из рисунков видно, что обе $pTRM$ образца № 502 (группа А) практически не обнаруживают хвостов, т. е. демонстрируют поведение, характерное для ОД зерен, хотя на диаграмме Дзя репрезентативная точка образца № 502 находится в МД области. У образца № 526 (группа Б) обе $pTRM$ обнаруживают огромные хвосты (30–40%), как у МД частиц. Обращает на себя внимание спад на кривой $pTRM(T_2, T_1)$ при T_1 после выключения поля $B_{лаб}$ (№ 526; рис. 2, ж), что характерно для поведения $pTRM$ крупных МД зерен [8]. У ОД частиц после выключения поля наблюдается подъем (№ 502; рис. 2, д), который связан с ростом спонтанной намагниченности при охлаждении [8].

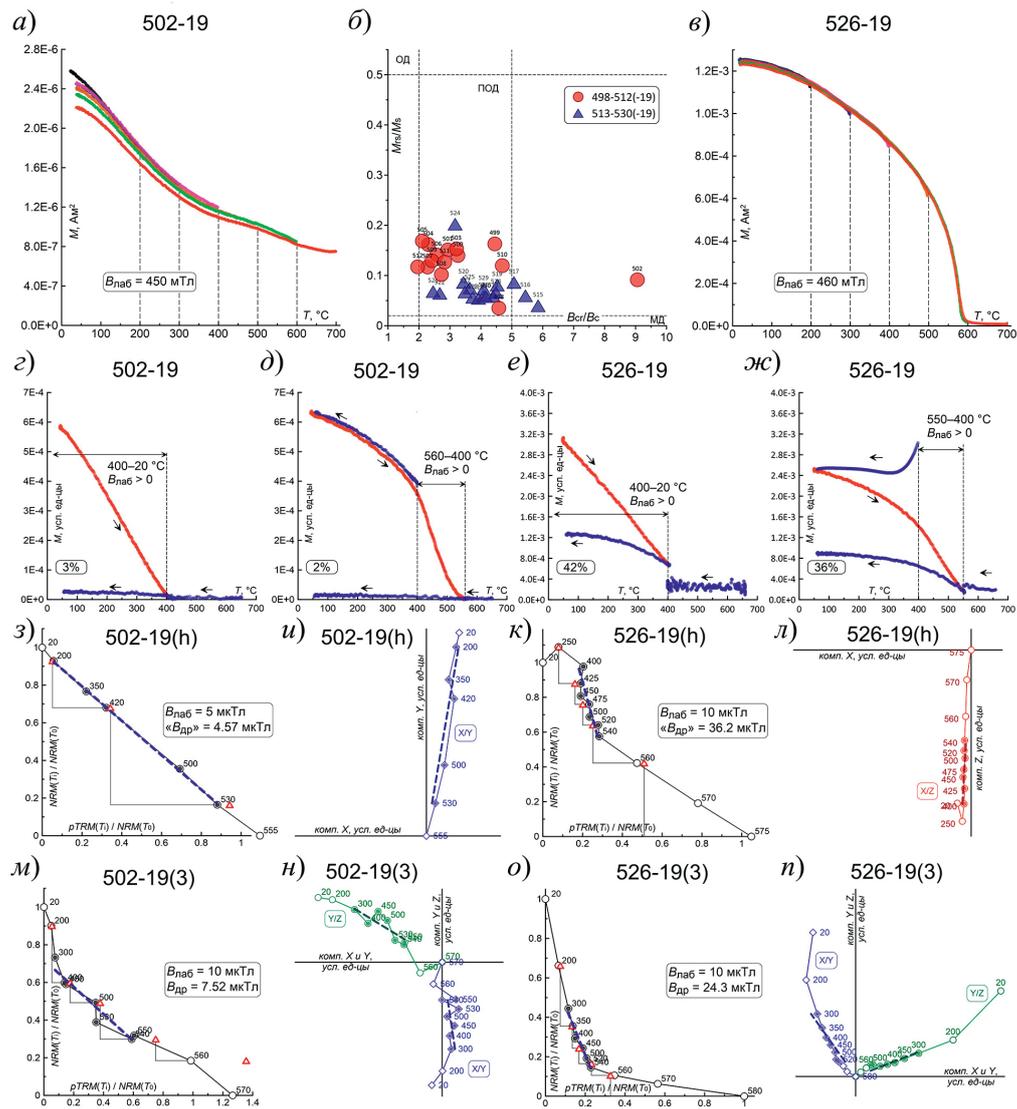


Рис. 2. Иллюстрация термомагнитных свойств пород: а и в – кривые нагрева намагниченности насыщения M_s до возрастающих температур T_i . Оценка доменной структуры: б – по диаграмме Дзя; г–ж – по термомагнитному критерию; з и е – низкотемпературные $pTRM(T_1, T_0)$; д и ж – $pTRM(T_2, T_1, T_2 > T_1)$ в fit-интервале; з–л – оценка лабораторного поля $B_{лаб}^*$ по $TRM(B_{лаб})$; м–п – оценка $B_{др}$ по NRM . з, к, м и о – диаграммы Арай-Нагата; и, л, н и п – диаграммы Зийдервелда.

Таким образом, по ТМ критерию, на T -интервале (T_0, T_2) $pTRM$ образцов группы А обнаруживается практически ОД поведение, а у группы Б – как у МД зерен.

Для определения $B_{др}$ наиболее надежными являются образцы с ОД магнитными зернами. Присутствие в породе МД зерен вносит значительную ошибку в результат: наклон диаграммы Арай-Нагата (АН) становится круче в НТ области, увеличивая тем самым определяемую по этой области величину поля, и напротив, в высокотемпературной области график выполаживается [8]. Это

было проверено экспериментально. Уже гретые образцы из групп А (№ 502) и Б (№ 526) нагрели выше T_c и охладили в известном лабораторном поле $B_{\text{лаб}}$, т. е. создали полную $TRM(B_{\text{лаб}})$. Далее была выполнена стандартная процедура Телле, построены диаграммы АН и Зийдвервельда и по ним оценено поле ($B_{\text{лаб}}^*$), в котором была создана $TRM(B_{\text{лаб}})$ (рис 2, з–л). У ОД образца № 502 на графике АН (рис. 2, з) видна прямая линия практически на всем T -интервале; оценка $B_{\text{лаб}}^*$ на fit-интервале (200–500) °С дает 4.72 мкТл при $B_{\text{лаб}} = 5$ мкТл. У МД образца № 526 на диаграмме АН (рис. 2, к) видно несколько изломов; оценка $B_{\text{лаб}}^*$ в fit-интервале (400–540) °С дает 36.2 мкТл и в интервале (540–575) °С – 7.5 мкТл при значении $B_{\text{лаб}} = 10$ мкТл. Таким образом, на МД образце № 526 оценка $B_{\text{лаб}}^*$ в fit-интервале дает величину поля более чем в 3.5 раза большую $B_{\text{лаб}}$. Кроме того, изломы на его диаграмме АН ложно указывают на присутствие нескольких компонент намагниченности, записанных в разных температурных интервалах. С другой стороны, присутствие в образцах группы А практически неокисленного магнетита и ильменита, в совокупности с их высокой термостабильностью и ОД характером ДС зерен-носителей NRM , с высокой вероятностью говорит о термоостаточной природе NRM образцов этой группы и, соответственно, о ее первичности.

Примеры оценки $B_{\text{др}}$ по NRM показаны на рис. 2, м–п. Оценка $B_{\text{др}}$ в fit-интервалах образцов дает 7.52 мкТл (№ 502) и 24.3 мкТл (№ 526). Такое большое различие в оценках $B_{\text{др}}$ между группами А и Б прослеживается для всех исследованных образцов. Но, как показано выше, образцы группы Б дают ложную информацию и не пригодны для определения $B_{\text{др}}$. Ниже обсудим результаты оценки палеонапряженности по образцам из группы А.

3.3. Обсуждение результатов. Результаты лабораторных экспериментов по оценке доменной структуры по ТМ критерию, а также с TRM , созданной в известном лабораторном поле, свидетельствуют о том, что диаграмма Дзэ не всегда позволяет уверенно различать ОД, ПОД и МД зерна. Возможно, это происходит потому, что для ее построения используются «массовые» магнитные параметры (M_s , M_{rs} , B_c , B_{cr}), чьи значения определяются магнитными зернами всех размеров, которые присутствуют в породе. Но наиболее надежными носителями термоостаточной намагниченности являются прежде всего ОД и малые ПОД частицы. При условии стабильности пород к нагревам ТМ критерий позволяет четко оценить размер частиц-носителей NRM в любом температурном интервале и, как следствие, оценить достоверность определения величины древнего поля по данному интервалу.

Достаточно надежные определения $B_{\text{др}}$ получены по 12 из 14 образцов группы А, представляющих два сайта в центральной части дайки (в 40 и 120 метрах от ее юго-восточного контакта). Всего, с учетом дублей, получено 18 оценок палеонапряженности (табл. 1). Параметр качества Q этих определений $B_{\text{др}}$ меняется в пределах 1–4.3. Fit-интервал образцов лежит в пределах от 280–400 °С до 500–570 °С. НТ-компонента по направлению близка к современному полю и дает величину поля в пределах 30–60 мкТл.

Табл. 1.

Определения палеонапряжённости методом Телье

Образец	$B_{\text{лаб}}^{\circ}$ мкПл	T_1-T_2 , °С	N_p	G	Q	F	$K, \times(-1)$	$B_{\text{др}}^{\circ}$ мкПл	$\sigma B_{\text{др}}^{\circ}$ мкПл	β	FR	$\delta CK, \%$	$DRT, \%$	$CDR, \%$	$mDR, \%$	\bar{Q}	$B_{\text{др}}^{\circ}$ мкПл
499-19(1)	5	400-530	4	0.65	0.6	0.39	0.99	4.94*	1.99	0.40	0.27	3.6	6.4	10.9	5.4	—	—
499-19(2)	10	400-575	10	0.80	4.0	0.58	0.38	3.81*	0.44	0.12	0.52	11.4	18.5	39.2	7.9	—	—
499-19(3)	10	400-560	7	0.74	2.6	0.54	0.50	5.03*	0.77	0.15	0.37	9.3	15.4	28.6	8.2	—	—
500-19(2)	20	400-530	4	0.59	1.2	0.30	0.24	4.86	0.70	0.14	0.20	0.4	1.4	-0.7	1.0	1.9	5.29
500-19(3)	5	400-530	4	0.64	1.0	0.46	0.67	3.36	1.03	0.31	0.24	6.1	11.2	9.6	6.4	—	—
500-19(4)	10	420-550	8	0.81	3.8	0.42	0.78	7.80	0.69	0.09	0.25	6.1	11.6	-3.0	8.2	—	—
500-19(6)	10	400-560	7	0.79	1.5	0.33	0.51	5.13	0.88	0.17	0.36	5.3	14.2	18.4	5.3	—	—
501-19(1)	10	400-550	5	0.68	4.3	0.60	0.47	4.74	0.45	0.10	0.32	9.1	13.7	9.9	6.1	2.9	6.55
501-19(2)	20	400-530	4	0.66	1.6	0.32	0.42	8.35	1.12	0.13	0.23	1.4	3.9	-1.7	3.0	—	—
502-19(2)	10	250-530	8	0.80	3.0	0.62	0.69	6.86	1.15	0.17	0.49	1.3	1.8	-4.3	1.3	3.1	7.19
502-19(3)	10	300-550	7	0.74	3.2	0.56	0.75	7.52	0.99	0.13	0.50	3.9	5.5	10.7	3.6	—	—
504-19(1)	20	400-560	5	0.69	1.5	0.56	0.41	8.11	2.10	0.26	0.47	1.0	1.6	2.6	1.3	1.5	8.11
505-19(1)	5	400-525	4	0.60	1.3	0.53	1.52	7.60	1.81	0.24	0.39	9.7	10.0	8.2	5.9	1.3	7.60
507-19(1)	5	300-500	4	0.62	1.0	0.70	0.85	4.27	1.77	0.42	0.36	4.6	5.0	-4.6	2.7	1.0	4.27
508-19(1)	5	300-525	5	0.74	1.3	0.35	0.82	4.12	0.82	0.20	0.27	6.7	14.8	7.9	10.9	2.0	6.55
508-19(2)	10	350-545	9	0.81	2.6	0.48	0.90	8.97	1.34	0.15	0.36	3.4	5.2	-3.8	3.1	—	—
509-19(1)	5	300-530	5	0.66	1.8	0.71	1.03	5.13	1.33	0.26	0.60	10.2	10.0	-11.5	5.7	2.1	6.07
509-19(3)	10	400-560	7	0.74	2.3	0.67	0.70	7.00	1.50	0.22	0.58	4.8	5.9	7.7	3.8	—	—
510-19(1)	5	400-530	4	0.62	1.1	0.34	0.60	2.99	0.58	0.19	0.29	4.7	11.7	8.8	7.3	2.2	5.25
510-19(2)	10	400-550	6	0.70	3.4	0.84	0.75	7.50	1.31	0.18	0.67	12.2	11.6	13.9	4.6	—	—
511-19(1)	5	400-530	4	0.65	0.5	0.22	0.85	4.27*	1.34	0.31	0.22	0.2	0.8	-1.0	0.5	—	—
512-19(1)	5	300-530	5	0.72	1.4	0.58	0.68	3.40	0.99	0.29	0.58	0.9	1.3	1.6	0.8	1.4	3.40
526-19(3)	10	300-540	7	0.81	3.8	0.41	2.43	24.3*	2.15	0.09	0.29	6.7	6.2	-4.1	3.3	—	—
528-19(3)	9	300-475	5	0.66	0.6	0.24	3.07	27.7*	6.87	0.25	0.28	3.5	4.5	-8.8	4.4	—	—

Примечания: $B_{\text{лаб}}^{\circ}$ – лабораторное поле; T_1-T_2 – температурный интервал, в котором определяется $B_{\text{др}}^{\circ}$; N_p – число точек в интервале T_1-T_2 ; G – «гар-фактор», показатель равномерности уменьшения NRM , меняется в пределах от 0 до 1; Q – фактор качества [5]; F – доля NRM в интервале T_1-T_2 на аппроксимирующей fit-линии; K – тангенс угла наклона fit-линии; $\sigma B_{\text{др}}^{\circ}$ – стандартная ошибка $B_{\text{др}}^{\circ}$; β – относительная стандартная ошибка $B_{\text{др}}^{\circ}$; FR – FRAC, доля векторной суммы изменений NRM в пределах T_1-T_2 ; δCK – отношение максимального отклонения чек-точек в пределах $T_1 < T_2$ к значению TRM на fit-линии; DRT – DRAT, отношение максимального абсолютного отклонения чек-точек в пределах $T_1 < T_2$ к длине fit-линии в интервале T_1-T_2 ; CDR – CDTRAT, отношение абсолютной суммы всех отклонений чек-точек с учетом знака в пределах $T_1 < T_2$ к длине fit-линии в интервале T_1-T_2 ; mDR – mDRAT, отношение CDTRAT к числу чек-точек в пределах $T_1 < T_2$; \bar{Q} и $B_{\text{др}}^{\circ}$ – средние значения по дублям.

Новые 23 определения $B_{др}$ достаточно кучные и меняются в пределах (2.99–8.35) мкТл. Если для дублей одного образца было получено 2–4 определения $B_{др}$, то сначала вычисляли среднее значение $B_{др}$ для данного образца, потом среднее значение для всех образцов группы А, которое составило (6.16 ± 0.92) мкТл. Используя значение палеонаклонения, полученное для образцов группы А при палеомагнитных исследованиях ($I_{др} = 77.1^\circ$), рассчитано значение виртуального дипольного момента: $VDM = (0.85 \pm 0.13) \times 10^{22}$ Ам².

Полученное на данном объекте значение VDM уникально по своему возрасту. Оно на порядок ниже величины $B_{др}$ в кайнозой (8 × 10²² Ам²) и вполне согласуется с единичными данными близкого возраста, представленными в мировой базе данных [9]. На рисунке 3 показаны значения VDM для архея и раннего протерозоя, отобранные из мировой базы данных по двум критериям: 1) определение палеонапряженности $B_{др}$ получено методом Телье-Коэ с выполнением процедуры check-points; 2) при расчете VDM число использованных определений $B_{др} \geq 3$. Из рисунка 3 видно, что в интервале времени 3.6–1.6 млрд лет наряду с многочисленной группой низких значений $VDM \approx (0.1–3) \times 10^{22}$ Ам² наблюдается также большая группа высоких значений $VDM \approx (5–10) \times 10^{22}$ Ам², характерных для фанерозоя. Этот факт выражен в появлении соответствующих двух пиков на гистограмме VDM (вставка к рис. 3). Возможное объяснение этому явлению — двухмодовый режим геодинамо в архее и раннем протерозое. Теоретически подобная модель развивалась в работе [10], где было предположено, что на ранней стадии эволюции Земли, до возникновения твердого ядра, магнитное поле могло генерироваться в двух режимах – слабого и сильного дипольного поля, которые чередовались во времени.

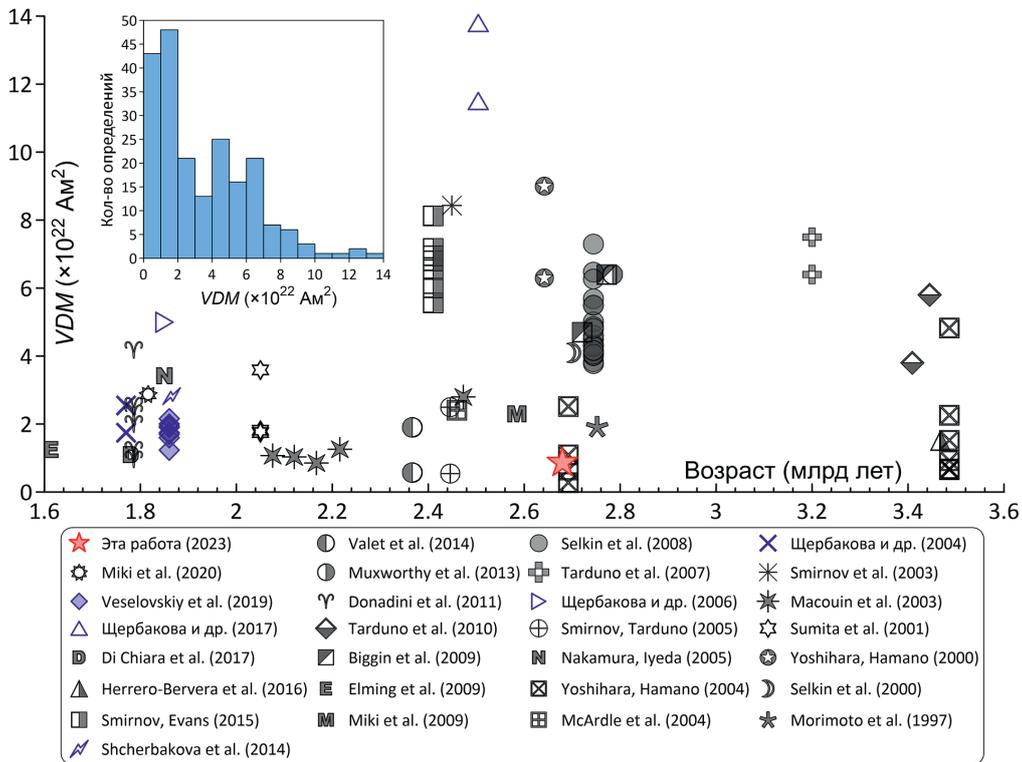


Рис. 3. Определения VDM в интервале 3.6–1.6 млрд лет (по мировой базе данных [9], ссылки там же).

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-27-00505, <https://www.rscf.ru/project/22-27-00505/>.

Литература

1. Степанова А.В., Самсонов А.В., Сальникова Е.Б., Егорова С.В., Ларионова Ю.О., Арзамасцев А.А., Ларионов А.Н., Суханова М.А., Веселовский Р.В. Великая дай-ка Кольского полуострова – маркер Архейской кратонизации в северной части Фенноскандинавского щита // *Петрология*. 2022. Т. 30, № 6. С. 623–643. <https://doi.org/10.31857/S0869590322060085>.
2. Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарев А.В., Фокин И.В., Патонин А.В., Пасенко А.М., Фетисова А.М., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А., Рудько Д.В., Чистякова А.В. Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» // *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. Т. 13, № 2. Ст. 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>.
3. Ефремов И.В., Веселовский Р.В. PMTools: новое программное обеспечение для анализа палеомагнитных данных // *Физика Земли*. 2023. № 5. С. 150–158. <https://doi.org/10.31857/S0002333723050022>.
4. Thellier E., Thellier O. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique // *Ann. Geophys.* 1959. Т. 15, Fasc. 3. P. 285–376.
5. Coe R.S. The determination of paleo-intensities of the Earth's magnetic field with emphasis on mechanisms which could cause non-ideal behavior in Thellier's method // *J. Geomagn. Geoelectr.* 1967. V. 19, No 3. P. 157–179. <https://doi.org/10.5636/jgg.19.157>.
6. Prevot M., Mankinen E.A., Coe R.S., Grommé C.S. The Steens Mountain (Oregon) geomagnetic polarity transition: 2. Field intensity variations and discussion of reversal models // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 1985. V. 90, No B12. P. 10417–10448. <https://doi.org/10.1029/jb090ib12p10417>.
7. Щербакова В.В., Пасенко А.М., Жидков Г.В., Щербаков В.П., Афиногенова Н.А. Ультранизкая напряженность геомагнитного поля в мезопротерозое по результатам исследования интрузивных тел уджинского авлакогена Сибирской платформы возрастом 1380 млн лет // *Физика Земли*. 2023. № 5. С. 24–46.
8. Shcherbakova V.V., Shcherbakov V.P., Heider F. Properties of partial thermoremanent magnetization in pseudosingle domain and multidomain magnetite grains // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2000. V. 105, No B1. P. 767–781. <https://doi.org/10.1029/1999JB900235>.
9. Мировая база данных по палеонапряженности // Веб-сайт геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН. 2022. URL: <http://www.brk.adm.yar.ru/palmag/index.html> (дата обращения: 15.03.2023).
10. Driscoll P.E. Simulating 2 Ga of geodynamo history // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43, No 11. P. 5680–5687. <https://doi.org/10.1002/2016GL068858>.

Поступила в редакцию 31.08.2023

Принята к публикации 28.09.2023

Щербакова Валентина Васильевна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории палеомагнетизма и физико-химических свойств горных пород

Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

пос. Борок, д. 142, Некоузский район, Ярославская область, 152742, Россия

E-mail: valia@borok.yar.ru

Веселовский Роман Витальевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, профессор, главный научный сотрудник лаборатории археомagnetизма и эволюции главного геомагнитного поля; и.о. заведующего кафедрой динамической геологии геологического факультета

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, Москва, 123242, Россия

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119234, Россия

E-mail: roman.veselovskiy@ya.ru

Жидков Григорий Викторович, научный сотрудник лаборатории палеомagnetизма и физико-химических свойств горных пород

Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

пос. Борок, д. 142, Некоузский район, Ярославская область, 152742, Россия

E-mail: grigor@borok.yar.ru

Афиногенова Наталья Александровна, младший научный сотрудник лаборатории палеомagnetизма и физико-химических свойств горных пород

Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

пос. Борок, д. 142, Некоузский район, Ярославская область, 152742, Россия

E-mail: aphina312@mail.ru

Самсонов Александр Владимирович, Член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории петрографии им. академика А.Н. Заварицкого

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук»

Старомонетный пер., д. 35, г. Москва, 119017, Россия,

E-mail: samsonovigem@mail.ru

Степанова Александра Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики докембрия

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии КарНЦ Российской академии наук

ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, 185910, Россия,

E-mail: sa07sa@mail.ru

Смирнов Михаил Анатольевич, инженер-исследователь лаборатории палеомagnetизма и физико-химических свойств горных пород

Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

пос. Борок, д. 142, Некоузский район, Ярославская область, 152742, Россия

E-mail: sma@borok.yar.ru

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.537-549

Paleomagnetism of the Great Dyke of the Kola Peninsula (2.68 Ga): New Evidence of Ultra-Low Paleointensity of the Earth's Magnetic Field in the Late Archean

V.V. Shcherbakova^{a*}, R.V. Veselovskiy^{b,c**}, G.V. Zhidkov^{a***}, N.A. Aphinogenova^{a****},
A.V. Samsonov^{d*****}, A.V. Stepanova^{e*****}, M.A. Smirnov^{a*****}

^aBorok Geophysical Observatory, Schmidt Institute of Physics of the Earth,
Russian Academy of Sciences, Borok, 152742 Russia

^bSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia

^cFaculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^dInstitute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry,
Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

^eInstitute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences,
Petrozavodsk, 185910 Russia

E-mail: *valia@borok.yar.ru, **roman.veselovskiy@ya.ru, ***grigor@borok.yar.ru,
****aphina312@mail.ru, *****samsonovigem@mail.ru, *****sa07sa@mail.ru, *****sma@borok.yar.ru

Received August 31, 2023; Accepted September 28, 2023

Abstract

Giant mafic dykes are the key markers of the Earth's evolution in the Precambrian and have been the subject of extensive research. This article presents the results of the paleomagnetic, rock-magnetic, and paleointensity B_{anc} studies of the Great Dyke of the Kola Peninsula (2.68 Ga). The mean paleomagnetic direction of the characteristic magnetization component and the paleomagnetic pole of the Murmansk craton were calculated using the data from 5 sites ($n = 41$ samples): $D = 117.6^\circ$, $I = 77.1^\circ$, $K = 40.9$, $\alpha_{95} = 12.1^\circ$, $slat = 69.265^\circ$, $slong = 34.35447^\circ$, $plat = 51.5^\circ$, $plong = 70.7^\circ$, $dp/dm = 21.1^\circ/22.6^\circ$, and $paleolat = 65^\circ$. The rocks under study were thoroughly examined for their thermomagnetic properties, revealing that the main carriers of remanent magnetization are single-domain or small pseudo-single-domain (group A) or multidomain (group B) magnetite. The paleointensity values $B_{anc} = (6.16 \pm 0.92) \mu\text{T}$ were obtained for 12 samples from group A by the Thellier–Coe method. The corresponding mean virtual dipole moment $VDM_{2.68\text{Ga}} = (0.85 \pm 0.13) \times 10^{22} \text{ Am}^2$ was determined. These new findings align with previous results on the Archean and Proterozoic objects, indicating that the Earth's magnetic field was remarkably weak in the Late Archean.

Keywords: Archean, Great Dyke of the Kola Peninsula, paleomagnetic pole, paleointensity, Thellier–Coe method

Acknowledgements. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-27-00505, <https://www.rscf.ru/project/22-27-00505/>).

Figure Captions

Fig. 1. Results of the rock-magnetic and paleomagnetic studies: *a*) anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) (projection on the lower hemisphere; K1, K2, K3 – the axes of the AMS ellipsoid: maximum, intermediate, and minimum, respectively; orange line corresponds to the dyke's strike); *b*) temperature dependence of magnetic susceptibility, sample 509-19: red curve – heating, blue curve – cooling; *c*, *d*) results of the demagnetization of sample 509-1 with temperature (*c*) and alternating field (AF) (*d*): Zijdeveld plot, stereoplot, and demagnetization plot. Black (white) circles on the Zijdeveld plot show

the projection of the *NRM* vector on the horizontal (vertical) plane; black circles on the stereoplot represent the projection of the *NRM* vector on the lower hemisphere; *e*) stereoplot with individual *ChRM* directions (gray circles), mean *ChRM* directions for each sampling site (with 95% confidence circles), and mean paleomagnetic direction (red dot and 95% confidence circle). Numeric labels correspond to the site numbers. Geographic coordinates.

Fig. 2. Thermomagnetic properties of the rocks: *a* and *c* – heating curves of the saturation magnetization M_i to increasing temperatures T_i . Evaluation of the domain structure: *b* – by the Day diagram; *d–g* – by the thermomagnetic criterion; *d* and *f* – low-temperature $pTRM(T_1, T_0)$; *e* and *g* – $pTRM(T_2, T_1, T_2 > T_1)$ in fit range; *h–k* – evaluation of the laboratory field B_{lab}^* by $TRM(B_{lab}^*)$; *l–o* – evaluation of B_{anc} by *NRM*. *h, j, l* and *n* – Arai plots; *i, k, m* and *o* – Zijdeveld diagrams.

Fig. 3. VDM determinations in the 3.6–1.6 Ga interval (according to the World Paleointensity Database [9], see references there).

References

1. Stepanova A.V., Samsonov A.V., Salnikova E.B., Egorova S.V., Larionova Yu.O., Arzamastsev A.A., Larionov A.N., Sukhanova M.A., Veselovskiy R.V. The Great Dyke of the Kola Peninsula as a marker of an Archean cratonization in the northern Fennoscandian shield. *Petrology*, 2022, vol. 30, no. 6, pp. 591–609. <https://doi.org/10.1134/S086959112206008X>.
2. Veselovskiy R.V., Dubinya N.V., Ponomarev A.V., Fokin I.V., Patonin A.V., Pasenko A.M., Fetisova A.M., Matveev M.A., Afinogenova N.A., Rud'ko D.V., Chistyakova A.V. Shared Research Facilities “Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism” of the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. *Geodin. Tektonofiz.*, 2022, vol. 13, no. 2, art. 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>. (In Russian)
3. Efremov I.V., Veselovskiy R.V. PMTools: New application for paleomagnetic data analysis. *Izv. Phys. Solid Earth*, 2023, vol. 59, no. 5, pp. 798–805. <https://doi.org/10.1134/S1069351323050026>.
4. Thellier E., Thellier O. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Geophys.*, 1959, vol. 15, fasc. 3, p. 285–376. (In French)
5. Coe R.S. The determination of paleo-intensities of the Earth's magnetic field with emphasis on mechanisms which could cause non-ideal behavior in Thellier's method. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 1967, vol. 19, no. 3, pp. 157–179. <https://doi.org/10.5636/jgg.19.157>.
6. Prevot M., Mankinen E.A., Coe R.S., Grommé C.S. The Steens Mountain (Oregon) geomagnetic polarity transition: 2. Field intensity variations and discussion of reversal models. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 1985, vol. 90, no. B12, pp. 10417–10448. <https://doi.org/10.1029/jb090ib12p10417>.
7. Shcherbakova V.V., Pasenko A.M., Zhidkov G.V., Shcherbakov V.P., Aphinogenova N.A. An ultralow geomagnetic field intensity in the Mesoproterozoic based on studies of 1380 Ma old intrusive bodies from the Udzha aulacogen of the Siberian Platform. *Izv. Phys. Solid Earth*, 2023, vol. 59, no. 5, pp. 682–703. <https://doi.org/10.1134/S1069351323050105>.
8. Shcherbakova V.V., Shcherbakov V.P., Heider F. Properties of partial thermoremanent magnetization in pseudosingle domain and multidomain magnetite grains. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2000, vol. 105, no. B1, pp. 767–781. <https://doi.org/10.1029/1999JB900235>.
9. The World Paleointensity Database. Website of the Borok Geophysical Observatory, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. 2022. URL: <http://www.brk.adm.yar.ru/palmag/index.html>.
10. Driscoll P.E. Simulating 2 Ga of geodynamo history. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, vol. 43, no. 11, pp. 5680–5687. <https://doi.org/10.1002/2016GL068858>.

⟨ Для цитирования: Щербакова В.В., Веселовский Р.В., Жидков Г.В., Афиногенова Н.А., Самсонов А.В., Степанова А.В., Смирнов М.А. Палеомагнетизм Великой дайки Кольского полуострова (2.68 млрд лет): новые свидетельства ультранизкой напряженности магнитного поля Земли в позднем архее // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 537–549. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.537-549>. ⟩

⟨ For citation: Shcherbakova V.V., Veselovskiy R.V., Zhidkov G.V., Aphinogenova N.A., Samsonov A.V., Stepanova A.V., Smirnov M.A. Paleomagnetism of the Great Dyke of the Kola Peninsula (2.68 Ga): New evidence of ultra-low paleointensity of the Earth's magnetic field in the Late Archean. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 537–549. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.537-549>. (In Russian) ⟩

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.384

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.550-562

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТА ВНУТРИФОРМАЦИОННЫХ КОНГЛОМЕРАТОВ В КАТАВСКОЙ СВИТЕ ПОЗДНЕГО РИФЕЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Н.П. Парфирьев, К.Н. Данукалов, И.В. Голованова, С.А. Дьякова

*Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
г. Уфа, 450077, Россия*

Аннотация

С целью проверки времени образования высокотемпературной компоненты (ВТК) естественной остаточной намагниченности (J_n) известняков позднерифейской катавской свиты на Южном Урале выполнены детальные петрографические, электронно-микроскопические и палеомагнитные исследования плоскообломочных синседиментационных карбонатных брекчий из трех блоков пород – один блок из обнажения в г. Миньяр и два блока из обнажения в г. Катав-Ивановск. Петрографические и электронно-микроскопические исследования показали, что гальки соответствуют по составу вмещающему матриксу, что дает возможность применения теста внутриформационных конгломератов. Во всех изученных блоках распределение палеомагнитных направлений для галек в целом хаотичное, кучность не превышает 3, что соответствует положительному тесту галек Грэхэма. Средние J_n галек имеют большой овал доверия и значительно отличаются от более кучных направлений в матриксе. Дополнительно к двум блокам из г. Катав-Ивановск применен критерий Ходжеса-Айне, а к блоку из г. Миньяр – критерий Рэля. Полученные на данном этапе исследований результаты могут свидетельствовать о первичной природе ВТК намагниченности катавских известняков.

Ключевые слова: палеомагнетизм, высокотемпературная компонента намагниченности, тест галек, Южный Урал, верхний рифей, катавская свита.

Введение

Катавская свита верхнего рифея является уникальным объектом для палеомагнитных исследований на Южном Урале. Обусловлено это качественным магнитным сигналом и выделением в разрезе записи большого количества инверсий геомагнитного поля [1–7]. Для корректного изучения инверсий древнего геомагнитного поля необходимо доказать синхронность высокотемпературной компоненты (ВТК) J_n времени образования пород. В случае доказательства синхронности образования ВТК J_n катавская свита может иметь большое значение для корреляции рифейских отложений, а также стать хорошим палеомагнитным временным репером в неопротерозойской истории Земли и дать важную информацию об особенностях поведения геомагнитного поля в позднем докембрии.

Палеомагнитное изучение катавской свиты началось в 1960-х гг., но до сих пор, несмотря на немалое количество работ, посвященных данной теме [1–5],

нет однозначного мнения о времени формирования древней характеристической намагниченности слагающих ее пород. Начиная с первых работ Р.А. Комиссаровой [1], распространено мнение о метахронной природе J_n пород катавской свиты. Связанно это с близостью средних палеомагнитных направлений J_n , выделенных в породах катавской свиты, с направлением геомагнитного поля позднекаменноугольно-пермского времени (эпохи Киама). Тот факт, что именно в это время в рассматриваемом регионе имели место активные тектонические процессы, связанные с закрытием Уральского океана [8] и формированием Пангеи, является косвенным аргументом в пользу вторичности древней намагниченности катавской свиты.

Позднее В.Э. Павлов и И. Галле [5], используя современное оборудование и методику, представили новые весомые аргументы в пользу первичности ВТК J_n , такие как: независимость направления характеристической компоненты от магнитной минералогии, отличие катавских палеомагнитных направлений от направлений в подстилающей и перекрывающей свитах, наличие в катавской свите тренда смещения наклона J_n снизу вверх по разрезу и близость палеомагнитного полюса катавской свиты к неопротерозойским палеомагнитным полюсам северо-запада Восточно-Европейской платформы.

Эти аргументы были подтверждены в работах сотрудников лаборатории геофизики Института геологии Уфимского федерального исследовательского центра (ИГ УФИЦ) РАН, а также дополнены новыми данными. В частности, была проведена корреляция магнитных зон в значительно удаленных между собой и находящихся в районах с несколько разной геологической историей разрезах катавской свиты в районе г. Миньяр, г. Юрюзань и д. Галиакберово. Также был прослежен тренд смещения палеомагнитных направлений не только по мощности разреза катавской свиты, а вплоть до нижней части вышележащей инзерской свиты [6, 7]. Всего за многолетнюю историю палеомагнитного изучения отложений катавской свиты было получено много косвенных аргументов «за» синхронность ВТК J_n , но точку мог бы поставить один из двух прямых палеомагнитных тестов: тест складки, использующий первичные деформации (складки оползания), или тест внутриформационных конгломератов. В настоящей работе мы приведем первые результаты теста внутриформационных конгломератов, которые могут свидетельствовать в пользу первичности J_n отложений катавской свиты.

1. Объекты и методы исследований

Позднерифейская катавская свита сложена известняками, часто со строматолитами и микрофитолитами, их глинистыми разностями и мергелями, с редкими тонкими прослоями глинистых сланцев и алевролитов [9]. Характерными особенностями свиты является пестрая окраска, тонкая (местами ленточная) слоистость. Благодаря особенностям состава и биостратиграфическим признакам катавская свита используется в качестве надежного корреляционного репера.

Для исследования были отобраны три блока плоскообломочных синседиментационных карбонатных брекчий из обнажений в гг. Миньяр и Катав-Ивановск (рис. 1). Гальки в брекчиях представлены угловатыми и реже

окатанными, несортированными, сильноцементированными обломками, размер которых варьирует от $2-3 \times 10$ мм до 0.5×7 см (рис. 1, в).

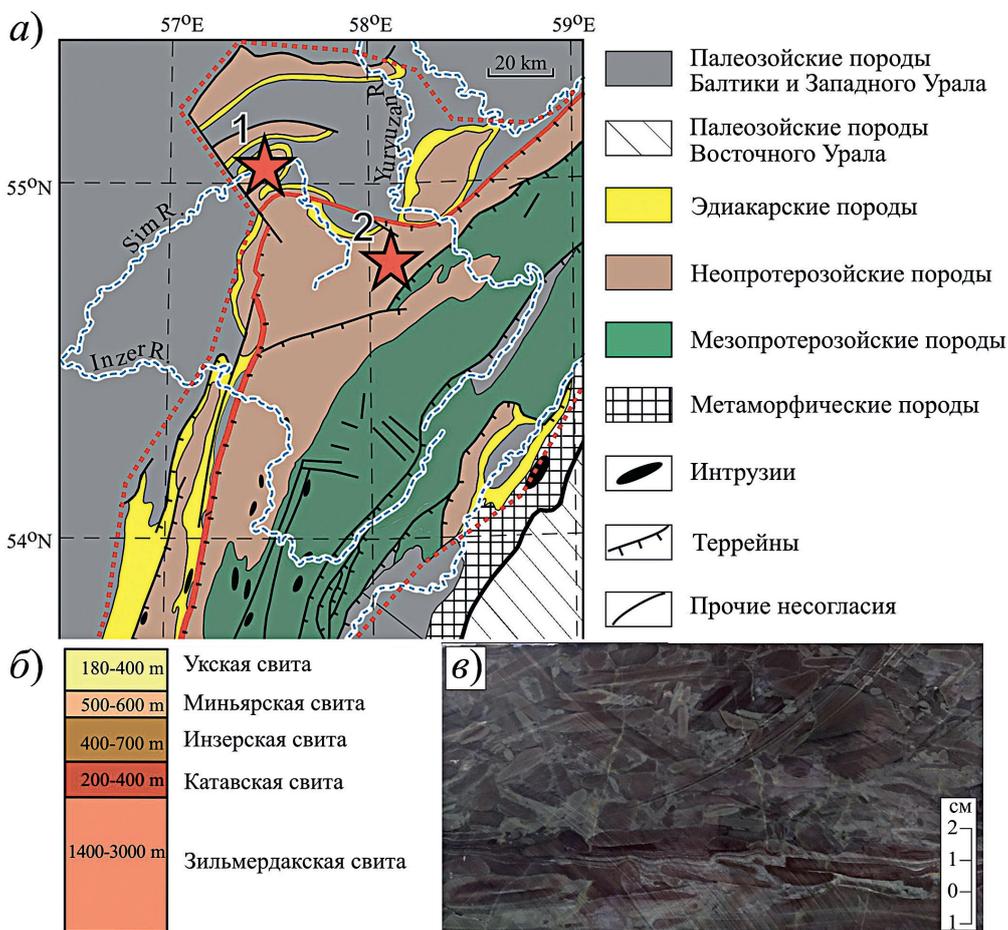


Рис. 1. а) Схематическая карта Южного Урала по [10], красными звездами обозначены места отбора проб: 1 – г. Миньяр, 2 – г. Катав-Ивановск; б) упрощенная стратиграфическая колонка последовательности Каратауской группы Южного Урала; в) образец синседиментационной брекчии (г. Миньяр)

Первый блок («а»), был отобран в г. Миньяр (рис. 1, обн. 1) из эллювиальных развалов вблизи обнажения, в связи с этим элементы залегания галек и матрикса выбраны условно. Блоки «б» и «в» из г. Катав-Ивановска (рис. 1, обн. 2) содержат плоскогалечные брекчии, которые преимущественно залегают в той же плоскости, что и вмещающая порода (матрикс). Всего из трех блоков конгломератов извлечено 96 галек (из них в 85 удалось выделить ВТК J_n) и 27 образцов матрикса (22 гальки и 18 образцов матрикса из блока «а», 63 гальки и 9 образцов матрикса из блоков «б» и «в»).

Образцы галек были подготовлены в виде пластин с линейными размерами 1.0–1.5 см и толщиной 0.3–1.0 см, образцы матрикса подготавливали под стандартный держатель спин-магнитометра JR-6 размером 2×2 см.

Палеомагнитные исследования проводили по общепринятой методике. Измерения J_n выполнялись в Центре коллективного пользования Института

физики Земли (ИФЗ) им. О.Ю. Шмидта РАН (г. Москва) на криогенном магнитометре (2G Enterprises, США) (гальки) и в лаборатории геофизики ИГ УФИЦ РАН (г. Уфа) на спин-магнитометре JR-6 (Agico, Чехия) (матрикс). Ступенчатое терморазмагничивание J_n образцов производили в немагнитных печах MMTD-80 (Magnetic Measurements, Великобритания) в ИФЗ РАН и TD48 (ASC Scientific, США) в ИГ УФИЦ РАН. Обработка результатов измерений естественной остаточной намагниченности выполнена с помощью пакета программ Р.Дж. Энкина [11] и PMTools [12].

При проведении теста внутриформационных конгломератов в первую очередь необходимо быть уверенным в том, что гальки соответствуют по составу вмещающему матриксу [4, 13]. Для этого проводили петрографические и электронно-микроскопические исследования. Петрографические шлифы из блоков «а» и «б» описаны с помощью поляризационного микроскопа МИН-8. Электронно-микроскопические исследования проведены в аншлифах размером 1.5×1.5 см со всех трех блоков на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 4 Compact с энергодисперсионным анализатором Xplorer 15 (Oxford Instruments, Великобритания) в ИГ УФИЦ РАН. Обработку спектров проводили автоматически с помощью программного пакета AzTec One (Oxford Instruments, Великобритания).

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Петрографические и электронно-микроскопические исследования.

По результатам петрографического исследования установлено, что основная масса породы сложена пелитоморфным карбонатным материалом, но участками с угловатыми крупными карбонатными зёрнами. Основная масса породы равномерно ожелезнена. Гальки представлены пелитоморфной карбонатной массой, но с примесью кварцевых зёрен. Галька пронизана тонкими углеродистоглинистыми слоями.

По результатам электронно-микроскопических исследований двух образцов брекчий, отобранных из обн. 1 и обн. 2 установлено, что основная масса породы представлена кальцитом (рис. 2). В виде хорошо раскристаллизованных минералов часто отмечаются гематит, магнетит, и барит, в редких зёрнах титаномагнетит. Из числа аксессуарных минералов установлены рутил, апатит и циркон.

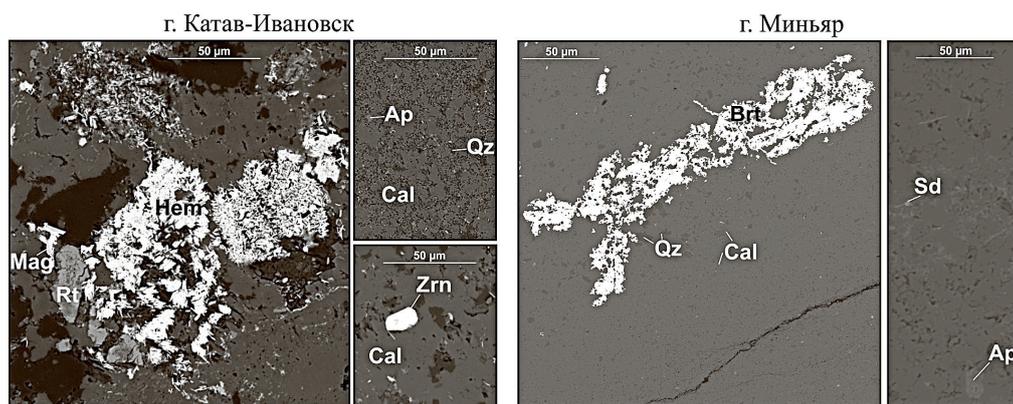


Рис. 2. Электронное BSE-изображение карбонатных пород катавской свиты. Условные обозначения: Ap – апатит, Brt – барит, Cal – кальцит, Hem – гематит, Mag – магнетит, Qz – кварц, Rt – рутил, Sd – сидерит, Zrn – циркон

При определении элементного состава кальцита не установлено значительной разницы в зернах матрикса и гальки (табл. 1). В отобранных образцах распределение основных элементов по содержанию следующее: углерод варьирует в пределах 21.03–19.34% (г. Катав-Ивановск) и 19.85–19.38% (г. Миньяр), т.е. для последнего характерны меньшие значения и короткий диапазон разброса. Содержание кислорода для образцов достаточно близкое – 60.99–59.65%. Для кальция наблюдается более выраженный разброс в значениях от 15.37% до 20.93%. В качестве примесей установлены Mg (0.31–1.20%), Al (0.27–1.87%), Si (0.07–2.15%), Fe (0.10–0.96%), Mn (0.07%), K (0.07–0.60%).

В целом для пород характерен достаточно близкий химический состав, что отражает сходство галек и вмещающего матрикса и позволяет использовать данные образцы карбонатных пород для проведения теста внутриформационных конгломератов.

Табл. 1

Элементный состав кальцита (атомные проценты)

Элемент	Катав-Ивановск						Миньяр					
	Матрикс			Галька			Матрикс			Галька		
C	20.70	19.86	19.98	19.34	20.01	21.03	19.85	19.40	19.82	19.43	19.38	19.49
O	60.68	59.96	60.02	60.99	60.34	60.89	59.65	59.74	60.09	60.03	59.69	59.78
Mg	0.31	1.20	1.19	0.31	0.41	0.46	0.20	0.23	0.41	0.41		
Al	0.76	0.11		1.34	0.33	0.37		0.27	1.10	1.87		
Si				2.15	0.53	0.61	0.07					
Ca	16.42	18.38	18.50	15.37	18.18	16.45	19.92	16.70	17.86	16.70	20.93	20.30
Fe	0.69	0.50	0.24	0.14	0.12	0.10		0.96	0.44	0.96		
Mn			0.07									
K	0.19			0.35	0.07	0.09		0.60	0.37	0.60		
Всего	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

3.2. Палеомагнитные исследования. В некоторых образцах качество палеомагнитного сигнала в породах оставляет желать лучшего, что, по-видимому, связано с малым размером образцов. Однако в подавляющем большинстве случаев сигнал вполне приемлемый (рис. 3). В шести образцах вообще не удалось выделить компоненты, в результате чего они были отбракованы, а пять образцов разрушились в ходе эксперимента. Распределение палеомагнитных направлений галек на полученных стереограммах в целом хаотичное, но в некоторых случаях отдельные образцы образуют небольшие группы. Тем не менее, во всех трех блоках кучность не превышает 3, что соответствует положительному тесту галек Грэхэма [14]. Средние направления имеют большой овал доверия и значительно отличаются от более кучных направлений в матриксе (рис. 4, табл. 2). К сожалению, получить достаточно представительную коллекцию образцов матрикса из второго блока, отобранного в районе г. Катав-Ивановск («в») не удалось, в связи с этим в работе представлена только стереограмма с распределением векторов образцов галек (рис. 5).

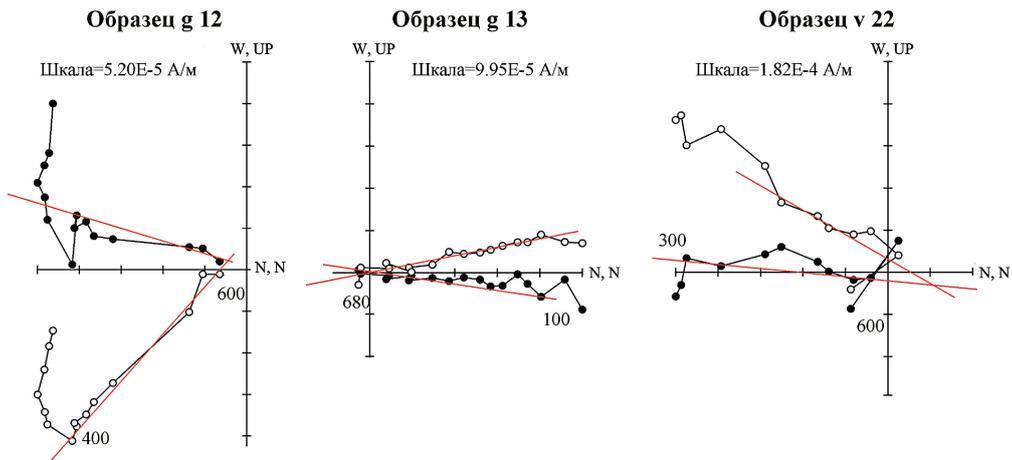


Рис. 3. Примеры ступенчатого терморазмагничивания образцов матрикса и галек отложений катавской свиты в стратиграфической системе координат. g 12 и g 13 – образцы матрикса и гальки из блока «а», v 22 – образец гальки из блока «б». Белые и черные точки – проекции векторов J_n на вертикальную и горизонтальную плоскости соответственно. Значения температуры нагрева приведены в °С

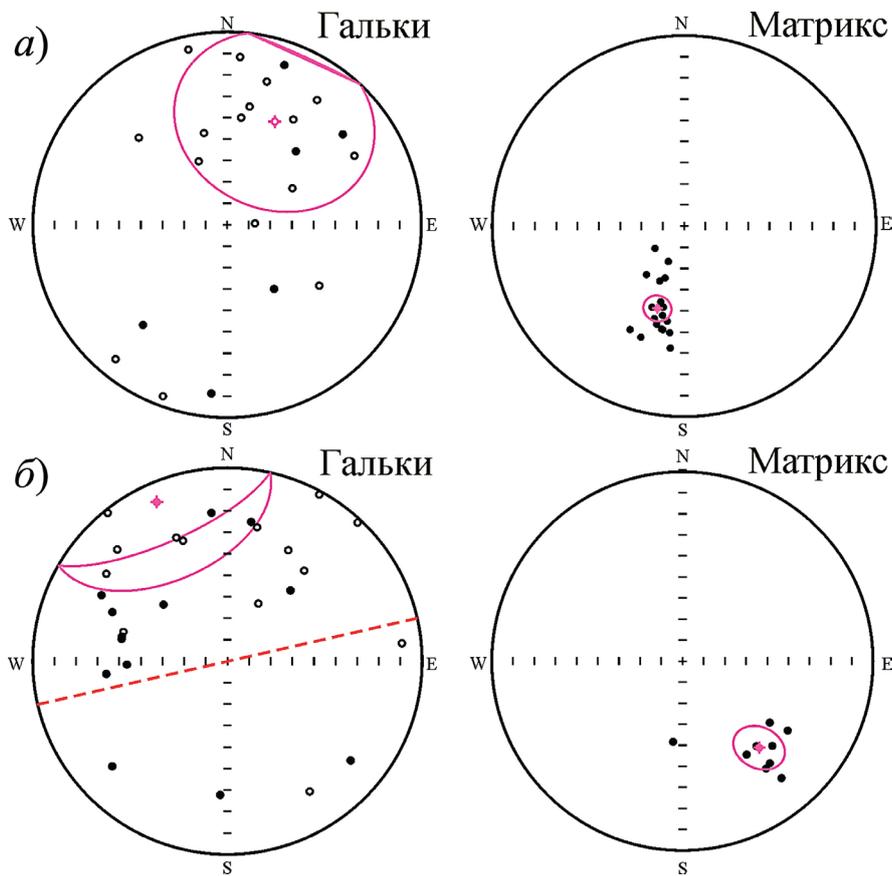


Рис. 4. Направления ВТК J_n образцов галек и матрикса в стратиграфической системе координат: а – блок из района г. Миньяр; б – блок из района г. Катав-Ивановск. Белые и черные точки на стереограммах – проекции вектора на нижнюю и верхнюю полусферы соответственно, красная пунктирная линия – диаметр для применения критерия Ходжеса-Айне

Табл. 2

Направления ВТК J_n образцов галек и матрикса в географической и стратиграфической системах координат

Блок	Гальки									
	N	D_g	I_g	K_g	α_{95}	N	D_s	I_s	K_s	α_{95}
«а»	22	24.7	-37	1.6	40.8	22	24.7	-37	1.6	40.8
«б»	27	335.3	-27	1.5	38.9	27	336.2	9	1.5	37.4
«в»	36	13.6	-33.8	1.7	28.8	36	10.7	-22	1.7	28.8
Матрикс										
«а»	18	204	44.7	24.3	7.2	18	204.4	45.6	24.3	7.2
«б»	9	24.1	-1.3	26.9	10.1	9	26.5	20.1	26.9	10.1

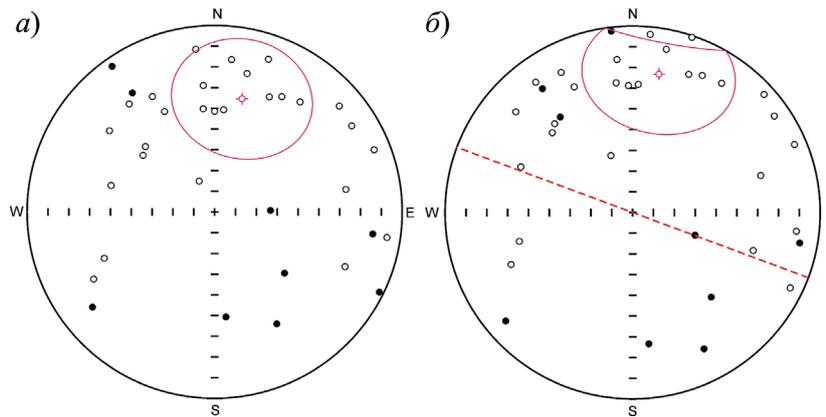


Рис. 5. Направления ВТК-намагниченности образцов галек в географической (а) и стратиграфической (б) системах координат для блока «в», отобранного в районе г. Катав-Ивановск. Белые и черные точки на стереограммах – проекции вектора на нижнюю и верхнюю полусферы соответственно, красная пунктирная линия – диаметр для применения критерия Ходжеса-Айне

Полученный результат соответствует двум основным признакам, наличие которых необходимо для проведения теста внутриформационных конгломератов: это малая кучность палеомагнитных направлений в образцах галек и их отличие от средних направлений в образцах матрикса [4]. Кроме того, данные проверены с использованием критериев Рэля и Ходжеса-Айне [15, 16].

К каждому из исследуемых блоков применяли различные критерии равномерности, зависящие от расположения галек в матриксе. Критерий Рэля был применен к блоку из г. Миньяр («а»), т.к. внутриформационные гальки в нем расположены хаотично. Для блоков («б», «в») из г. Катав-Ивановск, гальки в которых расположены субпараллельно напластованию, мы сочли более подходящим критерий Ходжеса-Айне.

Количество (N) и кучность (K) палеомагнитных векторов галек связаны с вектор-результантом (R) соотношением 1:

$$K = (N - 1) / (N - R), \quad (1)$$

откуда следует:

$$R = N - (N - 1) / K. \quad (2)$$

Нормированный вектор-результант:

$$\mathbf{r} = \mathbf{R} / N. \quad (3)$$

Для блока «а» были получены значения: вектор-результант $\mathbf{R} = 8.88$ и нормированный вектор-результант $\mathbf{r} = 0.4$. После этого объем выборки и нормированный вектор-результант сравнивались с таблицей критических значений Рэлея [15]. Полученные значения r позволяют утверждать, что направления извлечены из циклически равномерного распределения с уровнем значимости 0.025.

Блоки «б» и «в», как было отмечено выше, отобраны из плоскогалечных конгломератов, в которых, очевидно, плоские гальки имели тенденцию к выравниванию по поверхности напластования. Поэтому в отношении их был применен критерий равномерности распределения ориентировок в двумерном пространстве Ходжеса-Айне, согласно которому на круговой диаграмме проводится диаметр таким образом, чтобы по одну сторону от него находилось минимальное количество направлений. В нашем случае для блока «б» этот диаметр расположен приблизительно с юго-запада на северо-восток, а для блока «в» – с северо-запада на юго-восток. По одну сторону от этого диаметра должно находиться количество точек, не меньшее минимальных критических значений. С учетом общего количества векторов для стереограммы «б» – это 5 точек, а для стереограммы «в» – 7 точек. Согласно таблице критических значений [16] эти результаты соответствуют уровню значимости 0.01.

Очевидно (рис. 4 и 5), что для блоков «б» и «в» наблюдается тенденция к преимущественному группированию векторов компонент в северной полусфере стереограммы по отношению к южной. Это ухудшает соответствие распределения векторов критерию Ходжеса-Айне. На наш взгляд, такое распределение возможно по двум причинам. Во-первых, из-за малого размера галек на них мог попасть материал матрикса, который систематически «стягивал» направление результирующего вектора «в свою сторону». Во-вторых, гальки такого типа в основном образуются в приливно-отливной зоне [17]. Во время отлива частично консолидированный осадок растрескивается и затем или оседает на подстилающий, более мягкий слой, или смывается с краев на еще более нижние слои. В любом случае большинство галек располагаются субпараллельно напластованию матрикса (что и наблюдается во всех трех блоках), а также весьма вероятно, что большая часть галек не перевернется и не очень сильно развернется в горизонтальной плоскости. Это может исказить математическое соответствие критериям равномерности распределения.

По мнению авторов, тест внутриформационных конгломератов в катавской свите в первом приближении можно считать положительным. Полученные на данном этапе исследований результаты, хотя и рассматриваются как предварительные, могут свидетельствовать о первичности намагниченности пород катавской свиты. Для получения более убедительных результатов необходимо найти как минимум еще один образец конгломерата (брекчии), выделить из него более представительную коллекцию галек и повторно провести тест внутриформационных конгломератов с учетом уже полученного авторами опыта выполнения такого рода работ.

Заключение

По результатам изучения плоскообломочных синседиментационных карбонатных брекчий из трех блоков пород позднерифейской катавской свиты на Южном Урале проведен тест внутриформационных конгломератов.

С использованием петрографических и электронно-микроскопических исследований показано, что гальки конгломератов являются внутриформационными. Во всех изученных блоках результат теста галек Грэхэма положительный. Кучность распределения векторов ВТК J_n галек не превышает 3, их средние направления имеют большой овал доверия и значительно отличаются от более кучных направлений в матриксе. Кроме того, к блоку из г. Миньяр применен критерий Рэлея, а к двум блокам из г. Катав-Ивановск – критерий Ходжеса-Айне. Полученные на данном этапе исследований результаты могут свидетельствовать о первичной природе естественной остаточной намагниченности катавских известняков. Однако вопрос о синхронности естественной остаточной намагниченности катавских известняков слишком важен и требует дальнейшего изучения. Для получения более уверенного результата требуется найти новые образцы конгломерата (брекчий), выделить из них более представительную коллекцию галек и повторно провести тест внутриформационных конгломератов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность В.Э. Павлову за предоставление коллекции образцов из обнажения в г. Катав-Ивановск и ценные консультации в процессе проведения эксперимента, а также сотрудникам лаборатории главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН (г. Москва) за практическую помощь в проведении работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ, проект № 23-27-00018, <https://rscf.ru/project/23-27-00018/>.

Литература

1. *Комиссарова Р.А.* Исследование древней намагниченности некоторых осадочных пород Южного Урала в связи с проблемой метахронного перемагничивания: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ РАН СССР, 1970. 140 с.
2. *Данукалов Н.Ф., Комиссарова Р.А., Михайлов П.Н.* Палеомагнетизм рифея и венда Южного Урала // Стратотип рифея. Палеонтология. Палеомагнетизм: труды ГИН АН СССР / отв. ред. Б.М. Келлер. М.: Наука, 1982. Вып. 368. С. 121–161.
3. *Шипунов С.В.* Палеомагнетизм катавской свиты, Южный Урал // Физика Земли. 1991. № 5. С. 38–50.
4. *Шипунов С.В.* Основы палеомагнитного анализа: теория и практика. М.: Наука, 1993. 159 с.
5. *Павлов В.Э., Галле И.* Известняки катавской свиты: уникальный пример перемагничивания или идеальный регистратор неопротерозойского геомагнитного поля? // Физика Земли. 2009. № 1. С. 33–43.
6. *Данукалов К.Н., Голованова И.В., Сальманова Р.Ю., Парфирьев Н.П.* Палеомагнитное изучение красноцветных пород верхнего рифея Южного Урала // Геологический вестник. 2020. Вып. 3. С. 47–54. <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2020-3-3>.
7. *Golovanova I.V., Danukalov K.N., Salmanova R.Yu., Levashova N.M., Parfiriev N.P., Sergeeva N.D., Meert J.G.* Magnetic field hyperactivity during the early Neo-

- proterozoic: A paleomagnetic and cyclostratigraphic study of the Katav Formation, southern Urals, Russia // *Geosci. Front.* 2023. V. 14, No 4. Art. 101558. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101558>.
8. Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
 9. Козлов В.И. Верхний рифей и венд Южного Урала. М.: Наука, 1982. 128 с.
 10. Государственная геологическая карта Российской Федерации и сопредельной территории республики Казахстан. Карта дочетвертичных образований. Масштаб 1:1000000. Новая серия. Лист N-40(41) (Уфа) / под ред. В.И. Козлова. СПб.: ВСЕГЕИ, 2001.
 11. Enkin R.J. A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Sidney, B.C.: Pac. Geosci. Cent., Geol. Surv. Can., 1994. 16 p.
 12. Ефремов И.В., Веселовский Р.В. PMTools: новое программное обеспечение для анализа палеомагнитных данных // *Физика Земли.* 2023. № 5. С. 150–158. <https://doi.org/10.31857/S0002333723050022>.
 13. Шунунов С.В., Муравьев А.А. Критерии равномерности для сферических данных в палеомагнетизме // *Физика Земли.* 1997. № 12. С. 71–82.
 14. Graham J.W. The stability and significance of magnetism in sedimentary rocks // *J. Geophys. Res.* 1949. V. 54, No 2. P. 131-167. <https://doi.org/10.1029/JZ054i002p00131>.
 15. Дэвис Дж.К. Статистический анализ данных в геологии: в 2 кн. М.: Недра, 1990. Кн. 1. 319 с. Кн. 2. 427 с.
 16. Чини Р.Ф. Статистические методы в геологии. М.: Мир, 1986. 189 с.
 17. Carbonate Depositional Environments / Ed. by P.A. Scholle, D.G. Bebout, C.H. Moore. Tulsa, OK: Am. Assoc. Pet. Geol., 1983. 708 p. <https://doi.org/10.1306/M33429>.

Поступила в редакцию 07.09.2023

Принята к публикации 25.10.2023

Парфирьев Никита Петрович, младший научный сотрудник лаборатории геофизики

Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН

ул. К. Маркса, д. 16/2, г. Уфа, 450077, Россия

E-mail: parfirjev.nikita@yandex.ru

Данукалов Константин Николаевич, старший научный сотрудник лаборатории геофизики

Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН

ул. К. Маркса, д. 16/2, г. Уфа, 450077, Россия

E-mail: danukalov@mail.ru

Голованова Инесса Владимировна, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории геофизики

Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН

ул. К. Маркса, д. 16/2, г. Уфа, 450077, Россия

E-mail: golovanova@ufaras.ru

Дьякова Светлана Андреевна, младший научный сотрудник лаборатории геофизики

Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН

ул. К. Маркса, д. 16/2, г. Уфа, 450077, Россия

E-mail: riphony@ufaras.ru

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.550-562

**First Results of the Intraformational Conglomerate Test
of the Late Riphean Katav Formation (Southern Urals)**

*N.P. Parfiriev**, *K.N. Danukalov***, *I.V. Golovanova****, *S.A. Dyakova*****

*Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences,
Ufa, 450077 Russia*

*E-mail: *parfirjev.nikita@yandex.ru, **danukalov@mail.ru, ***golovanova@ufaras.ru,
****riphey@ufaras.ru*

Received September 7, 2023; Accepted October 25, 2023

Abstract

Detailed petrographic, electron-microscopic, and paleomagnetic studies were conducted on flat-bedded synsedimentary carbonate breccias from three blocks of rocks (one block from Minyar, two blocks from Katav-Ivanovsk) to verify the ideas about the time of formation of the high-temperature component (HTC) of natural remanent magnetization (J_n) of limestones from the Upper Riphean Katav Formation, Southern Urals. Petrographic and electron-microscopic observations revealed that the composition of pebbles corresponds to that of the host matrix rocks, thus enabling the use of an intraformational conglomerate test. In all the studied blocks, the distribution of paleomagnetic directions for pebbles is generally chaotic, with the concentration parameter not exceeding 3. These test results meet the Graham criterion. The pebbles' average J_n have a larger confidence oval and differ significantly from the matrix's directions with a much smaller confidence oval. The Hodges-Ajne test was applied to the blocks from Katav-Ivanovsk. The Rayleigh test was used for the block from Minyar. The results obtained at this stage indicate that the HTC of magnetization of the Katav limestones may have a primary origin. If this is confirmed, the Katav Formation would be a good paleomagnetic record of the Earth's Neoproterozoic history and provide valuable insights into the geomagnetic field behavior in the Late Precambrian.

Keywords: paleomagnetism, high-temperature component of magnetization, conglomerate test, Southern Urals, Upper Riphean, Katav Formation

Acknowledgements. We thank V.E. Pavlov for providing the collection of samples from the outcrop in Katav-Ivanovsk and for his guidance during the experiment, as well as our colleagues at the Laboratory of the Main Geomagnetic Field and Petromagnetism of Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences (Moscow) for their practical assistance.

This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-27-00018, <https://rscf.ru/project/23-27-00018/>).

Figure Captions

Fig. 1. *a)* Schematic map of the Southern Urals according to [10], where the red stars indicate the sampling sites: 1 – Minyar, 2 – Katav-Ivanovsk; *b)* simplified stratigraphic column of the sequence of the Karatau group, Southern Urals; *c)* the sample of synsedimentary breccia (Minyar).

Fig. 2. Backscattered electronic (BSE) image of carbonate rocks of the Katav Formation. Symbols: Ap – apatite, Brt – barite, Cal – calcite, Hem – hematite, Mag – magnetite, Qz – quartz, Rt – rutile, Sd – siderite, Zrn – zircon.

- Fig. 3. Examples of the Zijderveld diagrams for the studied samples of pebbles and matrix rocks of the Katav Formation in stratigraphic coordinates. g 12 and g 13 – pebbles from block “a”, v 22 – pebbles from block “b”. White and black points are the projections of the vectors \mathbf{J}_n on the vertical and horizontal planes, respectively. Temperatures are in °C.
- Fig. 4. HTC directions of \mathbf{J}_n of the pebble and matrix samples in stratigraphic coordinates: *a* – the block from the area of the city of Minyar, *b* – the block from the area of the city of Katav-Ivanovsk. Black and white points on the stereograms indicate the projection of the vector on the upper and lower hemispheres, respectively, and the red dotted line is the diameter for applying the Hodges-Ajne test.
- Fig. 5. Directions of the HTC magnetization of the pebble samples in geographic (*a*) and stratigraphic (*b*) coordinates for block “c” taken in the area of the city of Katav-Ivanovsk. Black and white points on the stereograms indicate the projections of the vector on the upper and lower hemispheres, respectively, and the red dotted line is the diameter for applying the Hodges-Ajne test.

References

1. Komissarova R.A. A study of the ancient magnetization of some sedimentary rocks in the Southern Urals in connection in relation to the problem of metachronous magnetization reversal. *Cand. Phys.-Math. Sci. Diss.* Moscow, IFZ Ross. Akad. Nauk SSSR, 1970. 140 p. (In Russian)
2. Danukalov N.F., Komissarova R.A., Mikhailov P.N. Paleomagnetism of the Riphean and Vendian of the Southern Urals. *Stratotip rifeya. Paleontologiya. Paleomagnetizm: Trudy Geol. Inst. Ross. Akad. Nauk* [Riphean Stratotype. Paleontology. Paleomagnetism: Proceedings of the Geological Institute of the USSR Academy of Sciences]. Keller B.M. (Ed.). Moscow, Nauka, 1982, no. 368, pp. 121–161. (In Russian)
3. Shipunov S.V. Paleomagnetism of the Katav Formation, Southern Urals. *Fiz. Zemli*, 1991, no. 5, pp. 38–50. (In Russian)
4. Shipunov S.V. *Osnovy paleomagnitnogo analiza: teoriya i praktika* [Basics of Paleomagnetic Analysis: Theory and Practice]. Moscow, Nauka, 1993. 159 p. (In Russian)
5. Pavlov V.E., Gallet Y. Katav limestones: A unique example of remagnetization or an ideal recorder of the Neoproterozoic geomagnetic field. *Izv., Phys. Earth*, 2009, vol. 45, no. 1, pp. 31–40. <https://doi.org/10.1134/S1069351309010054>.
6. Danukalov K.N., Golovanova I.V., Salmanova R.Yu., Parfiriev N.P. Paleomagnetic study of red-colored rocks of the Upper Riphean in the Southern Urals. *Geol. Vestn.*, 2020, no. 3, pp. 47–54. <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2020-3-3>. (In Russian)
7. Golovanova I.V., Danukalov K.N., Salmanova R.Yu., Levashova N.M., Parfiriev N.P., Sergeeva N.D., Meert J.G. Magnetic field hyperactivity during the early Neoproterozoic: A paleomagnetic and cyclostratigraphic study of the Katav Formation, southern Urals, Russia. *Geosci. Front.*, 2023, vol. 14, no. 4, art. 101558. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101558>.
8. Puchkov V.N. *Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii)* [Geology of the Urals and Cis-Urals (Current Problems of Stratigraphy, Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny)]. Ufa, DizainPoligrafServis, 2010. 280 p. (In Russian)
9. Kozlov V.I. *Verkhonii rifei i vend Yuzhnogo Urala* [Upper Riphean and Vendian of the Southern Urals]. Moscow, Nauka, 1982. 128 p. (In Russian)
10. Kozlov V.I. (Ed.) *State Geological Map of the Russian Federation and the Adjacent Territory of the Republic of Kazakhstan. Map of Pre-Quaternary Formations. Scale: 1:1 000000. New Series. Sheet N-40(41) (Ufa)*. St. Petersburg, VSEGEI, 2001.
11. Enkin R.J. A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Sidney, B.C., Pac. Geosci. Cent., Geol. Surv. Can., 1994. 16 p.
12. Efremov I.V., Veselovskiy R.V. PMTools: New application for paleomagnetic data analysis. *Izv., Phys. Earth*, 2023, vol. 59, no. 5, pp. 798–805. <https://doi.org/10.1134/S1069351323050026>.
13. Shipunov S.V., Murav'ev A.A. Uniformity criteria for spherical data in paleomagnetism. *Fiz. Zemli*, 1997, no. 12, pp. 71–82. (In Russian)

14. Graham J.W. The stability and significance of magnetism in sedimentary rocks. *J. Geophys. Res.*, 1949, vol. 54, no. 2, pp. 131–167. <https://doi.org/10.1029/JZ054i002p00131>.
15. Davis J.C. *Statisticheskii analiz dannykh v geologii* [Statistics and Data Analysis in Geology]. Moscow, Nedra, 1990. Book 1, 319 p. Book 2, 427 p. (In Russian)
16. Cheeney R.F. *Statisticheskie metody v geologii* [Statistical Methods in Geology]. Moscow, Mir, 1986. 189 p. (In Russian)
17. Scholle P.A., Bebout D.G., Moore C.H. (Eds.) *Carbonate Depositional Environments*. Tulsa, OK, Am. Assoc. Pet. Geol., 1983. 708 p. <https://doi.org/10.1306/M33429>.

⟨ **Для цитирования:** Парфирьев Н.П., Данукалов К.Н., Голованова И.В., Дьякова С.А. Первые результаты теста внутриформационных конгломератов в катавской свите позднего рифея (Южный Урал) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 550–562. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.550-562>. ⟩

⟨ **For citation:** Parfiriev N.P., Danukalov K.N., Golovanova I.V., Dyakova S.A. First results of the intraformational conglomerate test of the Late Riphean Katav Formation (Southern Urals). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 550–562. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.550-562>. (In Russian) ⟩

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 556.55+551.89+551.583.7

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.563-576

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ МАГНИТНО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОПЛЕЙСТОЦЕН-ГОЛОЦЕНОВЫХ ОСАДКОВ ОЗЕРА ТУРГОЯК

*Л.Р. Косарева¹, Н.Г. Нурғалиева¹, Д.К. Нурғалиев¹, Х.-Ч. Ли²,
П.С. Крылов¹, Д.М. Кузина¹, В.В. Антоненко¹*

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

²Национальный университет Тайваня, г. Тайбэй, 106, Тайвань

Аннотация

В статье приведены некоторые результаты сейсмоакустического профилирования бассейна и исследования магнитных свойств донных отложений озера Тургояк (Южный Урал). Толща озерных осадков в восточных впадинах достигает 8 м. Радиоуглеродное датирование образцов позволяет говорить о возрасте озера, составляющем не менее 25 тыс. лет. По данным сейсмоакустики нижняя часть разреза, представленная плотными осадками неоплейстоцена, накапливалась при более низком уровне воды. Голоценовые осадки представлены толщей слабоконсолидированных илов мощностью до 4 м. Показано, что магнитные свойства осадков характеризуют условия окружающей среды и колебания уровня озера. Скалярные магнитные величины в осадках показывают высокоамплитудные вариации, отражающие частую смену условий осадконакопления. Осадки с самыми высокими значениями магнитной восприимчивости (χ), естественной остаточной намагниченности (NRM), коэрцитивной силы намагниченности насыщения за вычетом влияния парамагнитной компоненты (B_c), коэрцитивной силы остаточной намагниченности насыщения (B_{cr}), намагниченности насыщения за вычетом парамагнитной компоненты (M_s), нормальной остаточной намагниченности насыщения (M_n) вероятно формировались в периоды ледового переноса осадочного материала со значительным участием эолового агента.

Ключевые слова: озерные отложения, радиоуглеродное датирование, палеолимнология, сейсмоакустическое профилирование, петромагнитные параметры, коэрцитивная спектроскопия, терромагнитный анализ.

Введение

В настоящее время изучение магнитно-минералогической составляющей донных отложений озер все чаще рассматривается как один из существенных этапов реконструкции условий озерного осадконакопления. Зерна магнитных минералов являются важной частью вещественного состава осадочных образований. Состав магнитной фракции обуславливает изменения петромагнитных параметров. Ее аллохтонная компонента привносится с территории водосборного бассейна и представлена твердой и растворенной фазой ледового и речного стока, эоловым и космогенным материалом, антропогенным веществом, автохтонная – представлена материалом, образованным в результате абразии берегов и дна водоема, гидрохимических и гидробиологических процессов [1].

Озеро Тургойк, являющееся жемчужиной Южного Урала, представляет большой научный интерес для изучения изменений климата региона и планеты. Несмотря на то, что современные озера являются ценными источниками информации об изменениях окружающей среды в течение последних тысячелетий, озеро Тургойк изучено недостаточно. Следует отметить работы, посвященные общим представлениям об истории формирования, развитии и геоморфологических особенностях озера [2, 3]. Строение осадочной толщи в северо-западной части озера, некоторые особенности вещественного состава, результаты диатомового изучения голоценовых отложений приведены в статье [4].

Целью исследования явилась предварительная характеристика магнитно-минералогических и генетических особенностей донных отложений озера Тургойк.

1. Объект исследований

Озеро Тургойк ($55^{\circ}09'40''$ с. ш., $60^{\circ}04'00''$ в. д.) является памятником природы Челябинской области. Его по праву называют «младшим братом Байкала» за прозрачность и чистоту воды. Котловина озера тектонического происхождения, расположена на восточном склоне Южного Урала и приурочена к межгорному прогибу, образованному хребтами Большого Таганая и Ильменских гор (рис. 1). Высота над уровнем моря составляет 320 м.

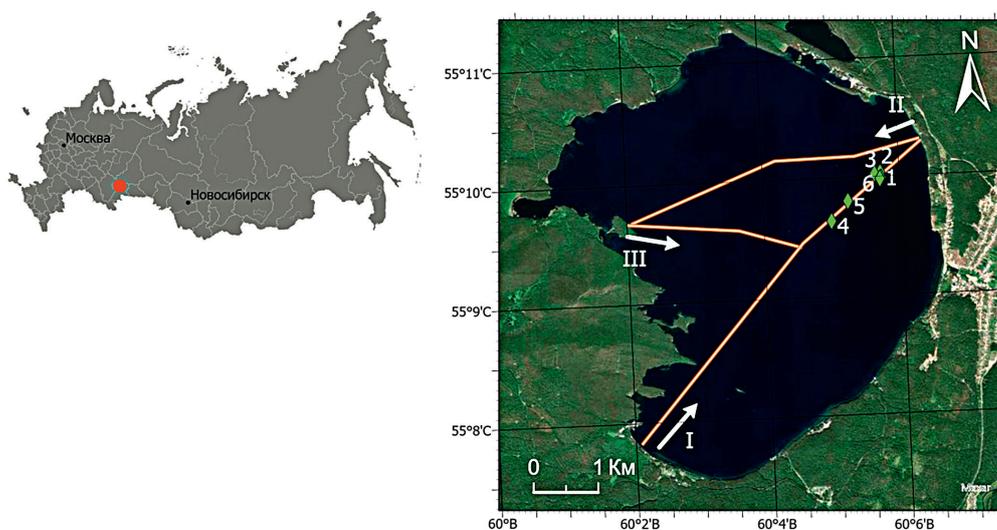


Рис. 1. Карта озера Тургойк. Расположение сейсмоакустических профилей указано римскими цифрами, места отбора керновых колонок – зелеными точками

Основные параметры озера Тургойк: площадь водной поверхности – 26.4 км^2 , длина – 6.9 км , наибольшая ширина – 6.3 км , средняя глубина – 19.1 м , максимальная глубина – 32 м . Озеро проточное, его гидрографическая сеть развита слабо. Площадь водосбора составляет 476 км^2 [5]. Питание озера в основном обеспечивают грунтовые воды, реки и ручьи. Озеро относится к олиготрофным. Вода пресная, гидрокарбонатного класса сульфатно-натриевого (II) типа группы кальция (по О.А. Алекину). Минерализация воды за послед-

ние 100 лет увеличивается и составляет 138 мг/л, прозрачность варьирует от 8 до 10.2 м [6].

2. Материалы и методы исследования

В 2017 г. в рамках научно-исследовательской экспедиции сотрудников Казанского федерального университета (КФУ) на основе предварительных сейсмоакустических данных были отобраны 6 керновых колонок донных отложений озера Тургойак. Сейсмоакустическое профилирование было проведено с использованием специализированного комплекса спроектированного и изготовленного на базе КФУ по трем профилям, пересекающим центральную часть озера (см. рис. 1). Анализ временных разрезов позволил определить наилучшие места для проведения отбора керна, обусловленные наличием стратифицированного осадка достаточной мощности без видимых нарушений сплошности и отсутствием газопроявлений [7].

При отборе керновых колонок использовали уникальный поршневого гидравлический донный пробоотборник, спроектированный и изготовленный в КФУ [8] и аналогичный по устройству отборнику [9]. В полевом лагере сразу после доставки керна на берег производили послойный отбор проб с шагом 2 см в немагнитные кубические пластиковые контейнеры для палеомагнитных исследований и маркированные zip-пакеты для лабораторных исследований. Хранение палеомагнитных образцов обеспечивали пермаллоевые экраны.

Магнитно-минералогический анализ проводился в Лаборатории палеоэкологии, палеоклиматологии, палеомагнетизма КФУ по образцам колонки № 5 (55° 02'45.5" с. ш., 60° 18'40.9" в. д. глубина воды – 31 м). Длина колонки составила 5.72 м (283 образца). Нижняя часть керна литологически представлена переслаиванием серых и зеленовато-серых глинистых и песчаных консолидированных алевритов с включениями галечного материала. Выше по разрезу осадок становится более светлым, переходя в зеленовато-серый консолидированный алеврит с включениями остатков растительности. Верхняя часть разреза представлена темным зеленовато-коричневым слабоконсолидированным осадком со значительным содержанием органического вещества.

Исследования содержания ^{14}C в образцах проводили на факультете наук о Земле Национального университета Тайваня (NTUAMS Lab) с использованием ускорительного масс-спектрометра 1.0 MV Tandetron (HVE, Нидерланды). Для калибровки возраста образцов применялась программа OxCal v4.2.4 Bronk Ramsey (2013) и калибровочная кривая IntCal 20.

По всем образцам колонки проводили измерения магнитной восприимчивости (χ) с использованием Каррабридж MFK-FA (AGICO, Чехия). Для получения спектров нормального намагничивания до полей 1.5 Тл использовали коэрцитивный спектрометр J_Meter [10, 11], позволяющий регистрировать отдельно остаточную и индуктивную намагниченности образцов при комнатной температуре. По кривым нормального намагничивания были определены следующие параметры [12, 13]: M_{rs} , M_s , M_p , B_c , B_{cr} , а также диа-/парамагнитная, ферромагнитная и суперпарамагнитная компоненты магнитной восприимчивости (χ_p , χ_f , χ_{sp}) [14].

Величину естественной остаточной намагниченности (*NRM*) измеряли на SQUID-магнитометре (2G Enterprise, США) в Палеомагнитном центре Новосибирского государственного университета (г. Новосибирск).

Для проведения термомагнитных исследований образцы отбирали равномерно по колонке с шагом 20 см. При помощи экспрессных весов Кюри [15] измеряли зависимость индуктивной намагниченности в поле до 0.2 Тл от температуры при скорости нагрева 100 °С/мин до температуры 800 °С.

3. Результаты и их обсуждение

В результате проведения сейсмоакустического профилирования были получены временные разрезы, анализ которых позволил выявить особенности строения озерной котловины и сложную картину морфологии дна (рис. 2) [7]. Следует отметить выходы коренных пород в водную толщу. В восточной части озера наблюдаются впадины с наибольшей мощностью осадочной толщи, достигающей 8 м (рис. 2, б). Нижняя часть разреза представлена плотными отложениями, приуроченными к самой глубокой части озера. Поскольку эти осадки не наблюдаются в менее глубоких впадинах, можно предположить, что седиментация происходила при значительно более низком уровне воды. Интенсивное акустическое отражение, вероятно связанное с перерывом в осадконакоплении, обусловленном климатическими колебаниями, отделяет плотную осадочную толщу и верхнюю часть разреза, представленную слабоконсолидированным алевритом мощностью до 4 м [7].

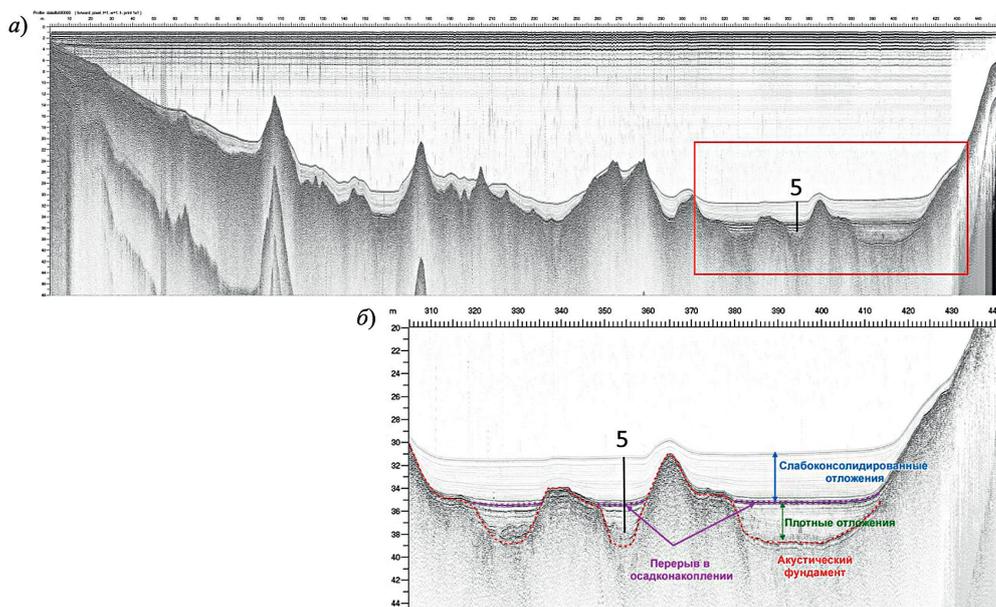


Рис. 2. Временные разрезы сейсмоакустического профилирования озера Тургойак: а) профиль 1; б) фрагмент профиля 1 [7]. Оцифровка горизонтального масштаба соответствует пикетам профиля, по вертикали отложена глубина в метрах относительно зеркала воды. Цифрой 5 отобрано место отбора керновой колонки

Результаты радиоуглеродного датирования (табл. 1) позволяют говорить о том, что толща озерных осадков стратиграфически относится к неоплейстоцену и голоцену.

Табл. 1

Результаты радиоуглеродного датирования донных отложений озера Тургояк, колонка № 5

№	Глубина отбора пробы, см	Лаб. номер определения	Материал	Калиброванный возраст, к. л. н.
1	1114	NTUAMS-6885-2s	Осадок	1040 ± 145
2	1162	NTUAMS-6886-1	Осадок	5065 ± 235
3	1218	NTUAMS-4328	Осадок	6620 ± 185
4	1241	NTUAMS-6887-1	Осадок	9895 ± 295
5	1272	NTUAMS-4327	Растительность	27390 ± 290
6	1312	NTUAMS-4326	Растительность	20485 ± 380
7	1329	NTUAMS-6888dd+es	Осадок	25410 ± 460
8	1376	NTUAMS-6889s	Осадок	25655 ± 275

Вариации петромагнитных и гистерезисных параметров, а также их соотношений представлены на основе климатической стадийности по схеме Блитта-Сернандера [16–19] на рис. 3 и 4. Неоплейстоцен и голоцен существенно различаются по характеру вариаций и значениям ряда магнитных параметров (табл. 2).

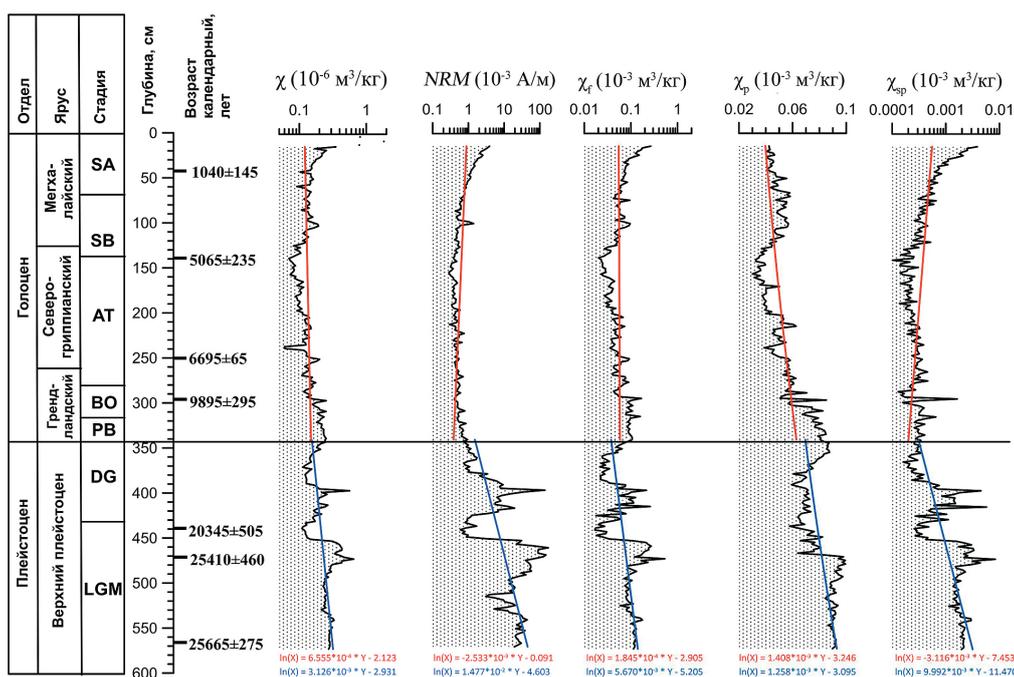


Рис. 3. Вариации значений петромагнитных параметров в осадках озера Тургояк, колонка № 5. Климатические стадии по [16–19]: LGM – максимум последнего оледенения, DG – дегляциация, включающая в себя ранний, средний, поздний дриас, аллерёдское и бёллингское потепление, PB – пребореальная, BO – бореальная, AT – атлантическая, SB – суббореальная, SA – субатлантическая стадии. Красным и синим цветом обозначены линии тренда и ниже уравнения регрессии для голоцена и плейстоцена соответственно

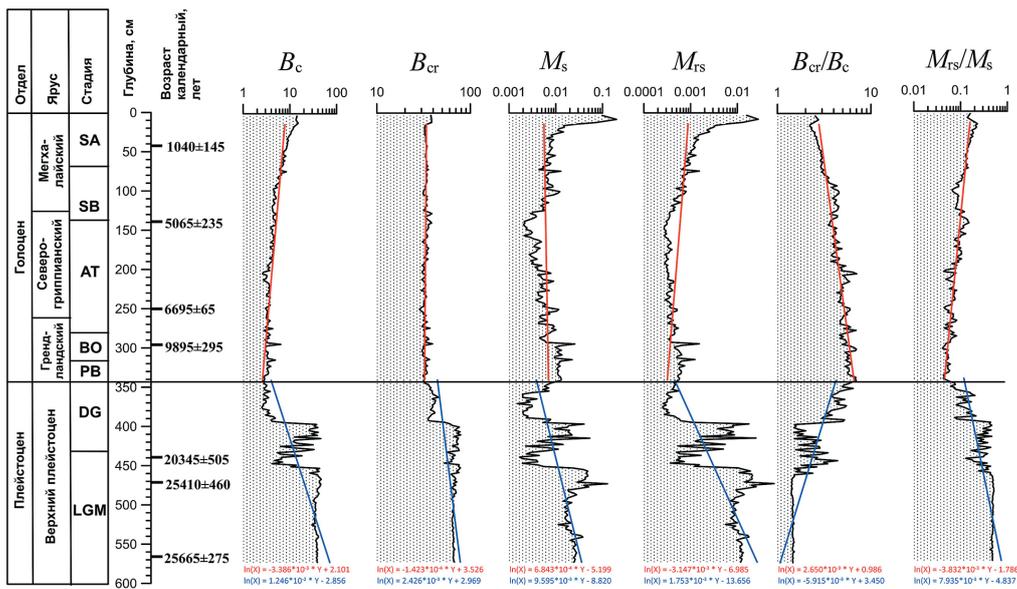


Рис. 4. Вариации значений гистерезисных магнитных параметров в осадках озера Тургойк, колонка № 5. Сокращения и обозначения – см. рис. 3

Табл. 2

Статистические характеристики петромагнитных параметров донных отложений озера Тургойк, колонка № 5 (\bar{X} – среднее арифметическое, σ – стандартное отклонение выборки)

Магнитный параметр	Неоплейстоцен			Голоцен		
	Диапазон	\bar{X}	σ	Диапазон	\bar{X}	σ
χ (10^{-6} м ³ /кг)	0.11–0.65	0.24	0.09	0.06–0.35	0.14	0.05
NRM (10^{-3} А/м)	0.597–171.600	22.986	31.372	0.285–3.901	0.686	0.526
χ_f (10^{-3} м ³ /кг)	0.017–0.534	0.095	0.072	0.020–0.266	0.063	0.033
χ_p (10^{-3} м ³ /кг)	0.058–0.099	0.081	0.011	0.030–0.087	0.052	0.014
χ_{sp} (10^{-3} м ³ /кг)	0.0002–0.0084	0.0015	0.0012	0.0001–0.0039	0.0004	0.0005
B_c	5.86–51.78	34.82	15.07	4.39–15.45	8.05	2.52
B_{cr}	35.2–78.9	61.7	11.97	28.6–39.4	33.2	1.7
M_s	0.0015–0.1279	0.0185	0.0168	0.0020–0.0278	0.0071	0.0040
M_{rs}	0.0003–0.0610	0.0081	0.0081	0.0003–0.0057	0.0007	0.0006
B_{cr}/B_c	1.40–6.46	2.28	1.24	2.22–7.04	4.47	1.17
M_{rs}/M_s	0.062–0.518	0.363	0.150	0.041–0.229	0.092	0.041

Такие вариации магнитных показателей являются характерными для рубежа неоплейстоцен – голоцен, обусловленного знаменательной климатической перестройкой от существенно холодного климата плейстоцена до теплого и влажного климата голоцена [20]. Повышенные значения магнитной восприимчивости и других магнитно-минералогических показателей в плейстоцене объясняются существенной ролью ледового и эолового переноса обломочного материала, вероятным участием космогенных частиц, а также образованием автохтонных сульфидов железа, в том числе и биогенных [21–23].

Соотношение гистерезисных параметров представлено на диаграмме Дзя-Данлопа [24, 25] на рис. 5. Ансамбль ферромагнитных зерен неоднороден, и обусловлен различными причинами изменения магнитных свойств. Следует отметить, наличие в осадке смеси однодоменных (ОД) зерен магнетита и грейгита, многодоменных (МД) и суперпарамагнитных (СП) частиц. Данные нижней части разреза, представленной плотными отложениями максимума последнего оледенения и частично осадками стадий дегляциации, достаточно хорошо соответствуют теоретической линии смешения однодоменного грейгита и магнетита (на рис. 5 – синий овал). Голоценовые слабоконсолидированные осадки характеризуются высоким содержанием многодоменной фракции (50–95%), наличием ОД частиц магнетита и грейгита, со значительным влиянием суперпарамагнетизма. Здесь из общей картины выделяются образцы верхней части разреза (осадки последнего тысячелетия, на рис. 5 – сиреневый овал) с более высокими содержаниями однодоменного магнетита по сравнению с нижележащими голоценовыми осадками.

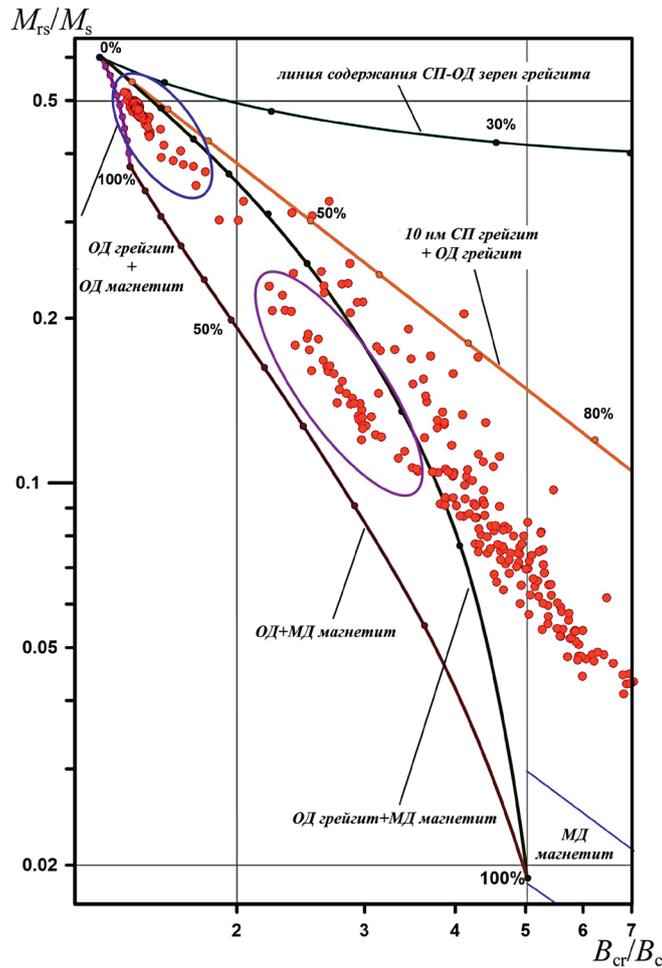


Рис. 5. Диаграмма Дзя-Данлопа [24, 25] для образцов озера Тургояк, включая теоретические линии концентраций (согласно [24]) для смесей грейгита и магнетита с различными размерами зерен. Численные значения для расчета линий смешения для магнетита и грейгита взяты из работ [26–28]

Согласно данным дифференциального термомагнитного анализа почти во всех образцах обнаруживается пирит по росту намагниченности в районе 450 °С и последующему спаду при приближении к температуре Кюри магнетита (рис. 6). Для этих образцов характерен рост намагниченности после первого прогрева из-за новообразованного магнетита. Также на второй кривой все еще наблюдается присутствие пирита, поскольку при первом нагреве он не полностью диссоциирует. Ближе к отметке 4 м вид кривых дифференциального термомагнитного анализа значительно изменяется, роста намагниченности после первого нагрева не наблюдается.

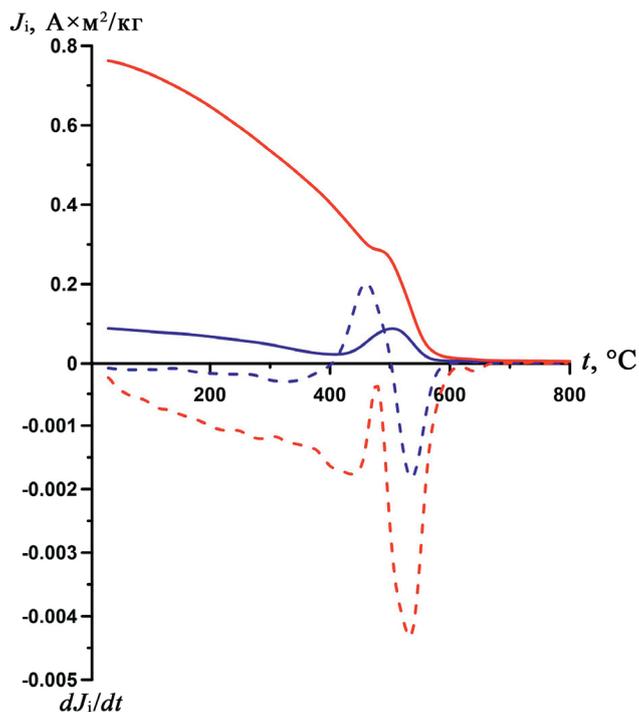


Рис. 6. Диаграмма дифференциального термомагнитного анализа для образца 1291, взятого на глубине 396 см. Сплошные линии – интегральные кривые, пунктир – дифференциальные. Синим цветом обозначен первый нагрев, красным – второй

Заключение

Сейсмоакустические исследования позволили выявить сложное строение озерной котловины, в разной степени заполненной стратифицированными осадками мощностью до 8 м. Акустическая граница разделяет плотный осадок от верхней толщи неконсолидированных алевритов мощностью порядка 4 м. Согласно радиометрическому датированию, возраст озера составляет не менее 25 тыс. лет.

Вариации значений магнитных параметров (магнитной восприимчивости, *NRM*, гистерезисных характеристик) указывают на их важную роль в литостратиграфическом отношении при маркировании неоплейстоцена и голоцена, отличавшихся климатическими условиями и структурой агентов переноса обломочного материала, а также соотношением автохтонного и аллохтонного вещества в осадочной озерной системе. Примечательным фактом является доминирующее присутствие ОД магнитных зерен в отложениях неоплейстоцена.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания проект № FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности.

Литература

1. *Страховенко В.Д., Белкина Н.А., Ефременко Н.А., Потахин М.С., Субетто Д.А., Фролова Л.А., Нигаматзянова Г.Р., Лудикова А.В., Овдина Е.А.* Первые данные по минералогии и геохимии взвеси Онежского озера // *Геология и геофизика*. 2022. Т. 63, № 1. С. 68–86. <https://doi.org/10.15372/GiG2020198>.
2. *Рогозин А.Г., Такачев В.А.* О некоторых гидрологических особенностях озера Тургояк // *Известия Челябинского научного центра*. 1998. № 1. С. 70–75.
3. *Дьянова О.П., Дерягин В.В.* Литолого-геоморфологические особенности побережий некоторых озер Южного Урала и Зауралья // *Вестник МГОУ. Серия: Естественные науки*. 2010. № 2. С. 106–112.
4. *Масленникова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В., Штенберг М.В.* Реконструкция этапа развития озера Тургояк (Южный Урал) в голоцене // *Литосфера*. 2018. Т. 18, № 6. С. 914–927. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927>.
5. *Андреева М.А.* Озера Среднего и Южного Урала. Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 1973. 272 с.
6. *Захаров С.Г.* Динамика экологического состояния озера Тургояк // *Известия русского географического общества*. 2020. Т. 152, № 1. С. 56–65. <https://doi.org/10.31857/S0869607120010085>.
7. *Крылов П.С.* Сейсмоакустика донных отложений современных озер как основа палеогеофизических и палеоклиматических реконструкций: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Казань, 2018. 24 с.
8. *Борисов А.С.* Система технологического обеспечения палеомагнитных исследований отложений современных озер: автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Казань, 2004. 46 с.
9. *Mackereth F.J.H.* A portable core sampler for lake sediments // *Limnol. Oceanogr.* 1958. V. 3, No 2. P. 181–191. <https://doi.org/10.4319/lo.1958.3.2.0181>.
10. *Jasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov B.V., Heller F.* A modernized coercivity spectrometer // *Geol. Carpathica*. 1998. V. 49, No 3. P. 224–225.
11. *Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г.* Коэрцитивный спектрометр. Патент РФ на полезную модель. № 81805. 2009. Бюл. ФИПС № 9.
12. *Шолто Л.Е.* Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. Л.: Недра, 1977. 182 с.
13. *Kruiver P.P., Dekkers M.J., Heslop D.* Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2001. V. 189, No 3–4. P. 269–276. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00367-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00367-3).
14. *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 J. Earth Sci.* 2015. V. 4, No 1. P. 1–6.
15. *Буров Б.В., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г.* Палеомагнитный анализ. Казань: Издательство Казанского университета, 1986. 167 с.
16. *Blytt A.G.* Forsøg til en Theorie om Indvandringen af Norges Flora under vexlende regnfulde og tørre Tider // *Nyt Mag. Naturvidensk.* 1876. Bd. 21, H. 4. S.
17. *Blytt A.G.* Essay on the Immigration of the Norwegian Flora during the Alternating Rainy and Dry Period. Christiania: Alb. Cammermayer, 1876. 89 p.

18. *Sernander R.* Studier öfver den Gótländska vegetationens utvecklingshistora: Akad. afh. Uppsala: Nya Tidnings Aktie-Bolags Tr., 1894. 112 s.
19. *Ravazzi C.* An overview of the Quaternary continental stratigraphic units based on biological and climatic events in Italy // *II Quaternario. Ital. J. Quat. Sci.* 2003. V. 16, No 1. P. 11–18.
20. *Крайнов М.А., Безрукова Е.В., Кербер Е.В., Левина О.В., Иванов Е.В., Щетников А.А., Филинов И.А.* Первые результаты исследования донных отложений озера Баунт (Северное Забайкалье) // *Геология и геофизика.* 2017. Т. 58, № 11. С. 1764–1776. <https://doi.org/10.15372/GiG20171110>.
21. *Steffensen J.P.* The size distribution of microparticles from selected segments of the Greenland Ice Core Project ice core representing different climatic periods // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 1997. V. 102, No C12. P. 26755–26763. <https://doi.org/10.1029/97JC01490>.
22. *Simonsen M.F., Baccolo G., Blunier T., Borunda A., Delmonte B., Frei R., Goldstein S., Grinsted A., Kjør H.A., Sowers T., Svensson A., Vinther B., Vladimirova D., Winckler G., Winstrup M., Vallelonga P.* East Greenland ice core dust record reveals timing of Greenland ice sheet advance and retreat // *Nat. Commun.* 2019. V. 10, No 1. Art. 4494. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12546-2>.
23. *Субетто Д.А.* Донные отложения озер. Палеолимнологические реконструкции. СПб.: Издательство РГПУ имени А.И. Герцена, 2009. 343 с.
24. *Snowball I.F.* Magnetic hysteresis properties of greigite (Fe_3S_4) and a new occurrence in Holocene sediments from Swedish Lapland // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1991. V. 68, No 1–2. P. 32–40. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(91\)90004-2](https://doi.org/10.1016/0031-9201(91)90004-2).
25. *Day R., Fuller M., Schmidt V.A.* Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1977. V. 13, No 4. P. 260–267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X).
26. *Dunlop D.J.* Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2002. V. 107, No B3. P. EPM 4-1–EPM 4-22. <https://doi.org/10.1029/2001JB000486>.
27. *Chang L., Roberts A.P., Tang Y., Rainford B.D., Muxworthy A.R., Chen Q.* Fundamental magnetic parameters from pure synthetic greigite (Fe_3S_4) // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2008. V. 113, No B6. Art. B06104. <https://doi.org/10.1029/2007JB005502>.
28. *Dekkers M.J., Schoonen M.A.A.* Magnetic properties of hydrothermally synthesized greigite (Fe_3S_4)—I. Rock magnetic parameters at room temperature // *Geophys. J. Int.* 1996. V. 126, No 2. P. 360–368. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb05296.x>.

Поступила в редакцию 25.10.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Косарева Лина Раисовна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник НИЦ «Цифровая Земля» Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: lina.kosareva@mail.ru

Нурғалиева Нурия Гавазовна, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии нефти и газа Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: nouria.nourgalieva@kpfu.ru

Нурғалиев Данис Карлович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *Danis.Nourgaliev@kpfu.ru*

Хун-Чун Ли, доктор философии в области геологии, профессор, заведующий лабораторией радиоуглеродного датирования с применением ускорительной масс-спектрометрии (NTUAMS Lab), факультет наук о земле

Национальный университет Тайваня
Рузвельт роуд, 1, Секция 4, г. Тайбэй, 106, Тайвань
E-mail: *hcli1960@ntu.edu.tw*

Крылов Павел Сергеевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник НИЛ изучения бассейнов нефтегазонакоплений Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *pskrylov@kpfu.ru*

Кузина Диляра Мтыгулловна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник НИЛ палеоклиматологии, палеоэкологии, палеомагнетизма Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *di.kuzina@gmail.com*

Антоненко Вадим Вячеславович, младший научный сотрудник НИЛ изучения бассейнов нефтегазонакоплений Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *stay_uzeless@mail.ru*

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2023, vol. 165, no. 4, pp. 563–576

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.563-576

Preliminary Magnetic Mineralogical Studies of the Neopleistocene-Holocene Sediments from Lake Turgoyak

L.R. Kosareva^{a}, N.G. Nurgalieva^{a**}, D.K. Nurgaliev^{a***}, H.-C. Li^{b****}, P.S. Krylov^{a*****},
D.M. Kuzina^{a*****}, V.V. Antonenko^{a*****}*

^aKazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

^bNational Taiwan University, Taipei, 106 Taiwan

E-mail: **lina.kosareva@mail.ru, **nouria.nourgalieva@kpfu.ru, ***Danis.Nourgaliev@kpfu.ru, ****hcli1960@ntu.edu.tw, *****pskrylov@kpfu.ru, *****di.kuzina@gmail.com, *****stay_uzeless@mail.ru*

Received October 25, 2023; Accepted November 30, 2023

Abstract

This article reports on some preliminary findings of a study on the seismoacoustic profiling of the basin of Lake Turgoyak (Southern Urals) and the magnetic properties of its bottom sediments. In the eastern depressions, the lake sediments are up to 8 m thick. The radiocarbon dating of the sedi-

ment samples suggests that the lake is at least 25 000 years old. The seismoacoustic data reveal that the lower part of the section, which is composed of the dense Neopleistocene sediments, accumulated when the water level was lower. The Holocene sediments are poorly consolidated silts up to 4 m thick. The magnetic properties of the sediments were found to be indicative of the environmental conditions and fluctuations in the lake level. The high-amplitude variations in the scalar magnetic values of the sediments point to frequent changes in the sedimentation conditions. The sediments with the highest magnetic susceptibility (χ), natural remanent magnetization (NRM), coercive force (B_c), coercivity of remanence (B_{cr}), saturation magnetization (M_s), and magnetization remanence (M_{rs}) are likely to have formed during the periods when sedimentary material was transported by ice, often with a significant influence from wind.

Keywords: lake sediments, radiocarbon dating, paleolimnology, seismoacoustic profiling, petromagnetic properties, coercive spectroscopy, thermomagnetic analysis

Acknowledgements. This study was supported by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment in the sphere of scientific activities (project no. FZSM-2023-0023).

Figure Captions

- Fig. 1. Map of Lake Turgoyak. The seismoacoustic profiles are indicated with Roman numbers, the coring sites marked by green dots.
- Fig. 2. Time depth of the seismoacoustic profile of Lake Turgoyak: *a*) profile 1; *b*) the fragment of profile 1 [7]. Digitization of the horizontal scale corresponds to the profile stations; the vertical scale shows the depth in meters relative to the water surface. Coring sites are marked with 5.
- Fig. 3. Variations of the magnetic parameters in the sediments of Lake Turgoyak, core sample 5. Climatic stages given according to [16–19]: LGM – Last Glacial Maximum, DG – Deglaciation, including the Early, Middle, and Younger Dryas, as well as the Allerød-Bølling warm period, PB – Preboreal, BO – Boreal, AT – Atlantic, SB – Subboreal, SA – Subatlantic. The trend lines for the Holocene and Pleistocene are indicated in red and blue, respectively; the regression equations are shown below in the corresponding colors.
- Fig. 4. Variations of the hysteresis magnetic parameters of the sediments of Lake Turgoyak. See Fig. 3 for abbreviations and designations.
- Fig. 5. Day-Dunlop plot [24, 25] for the samples from Lake Turgoyak, including the theoretical mixing lines (according to [24]) of greigite and magnetite mixtures with different grain sizes. Numerical values for calculations of the magnetite and greigite mixing lines taken from [25–27].
- Fig. 6. Differential thermomagnetic analysis diagram for sample 1291 collected from a depth of 396 cm. Solid lines are integral curves, dashed lines are differential curves. Blue and red colors indicate the first and second heating, respectively.

References

1. Strakhovenko V.D., Belkina N.A., Efremenko N.A., Potakhin M.S., Subetto D.A., Frolova L.A., Nigamatzyanova G.R., Ludikova A.V., Ovdina E.A. The first data on the mineralogy and geochemistry of the suspension of Lake Onego. *Russ. Geol. Geophys.*, 2022, vol. 63, no. 1, pp. 55–71. <https://doi.org/10.2113/RGG20204280>.
2. Rogozin A.G., Takachev V.A. On some hydrological features of Lake Turgoyak. *Izv. Chelyab. Nauchn. Tsentra*, 1998, no. 1, pp. 70–75. (In Russian)
3. Diyanova O.P., Deryagin V.V. Lithologic and geomorphological characteristics of some lakes in the Southern Urals and Trans-Urals. *Vestn. MGOU. Ser.: Estestv. Nauki*, 2010, no. 2, pp. 106–112. (In Russian)
4. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V., Shtenberg M.V. Reconstruction of Turgoyak Lake (the Southern Urals) ecosystem changes in Holocene. *Litosfera*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 914–927. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927>. (In Russian)

5. Andreeva M.A. *Ozera Srednego i Yuzhnogo Urala* [Lakes of the Middle and Southern Urals]. Chelyabinsk, Yuzhno-Ural. Kn. Izd., 1973. 272 p. (In Russian)
6. Zakharov S.G. Dynamics of the environmental status of Lake Turgoyak. *Izv. Russ. Geogr. O-va.*, 2020, vol. 152, no. 1, pp. 56–65. <https://doi.org/10.31857/S0869607120010085>. (In Russian)
7. Krylov P.S. Seismoacoustics of the bottom sediments of modern lakes as a basis for paleogeophysical and paleoclimatic reconstructions. *Extended Abstract of Cand. Geol-Mineral. Sci.* Kazan, 2018. 24 p. (In Russian)
8. Borisov A.S. An engineering support system for the paleomagnetic investigations of modern lake sediments. *Extended Abstract of Doct. Geol-Mineral. Sci.* Kazan, 2004. 46 p. (In Russian)
9. Mackereth F.J.H. A portable core sampler for lake sediments. *Limnol. Oceanogr.*, 1958, vol. 3, no. 2, pp. 181–191. <https://doi.org/10.4319/lo.1958.3.2.0181>.
10. Jasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov B.V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer. *Geol. Carpathica*, 1998, vol. 49, no. 3, pp. 224–225.
11. Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. Coercivity spectrometer. Utility Model Patent no. 81805. *FIPS Byull.*, no. 9, 2009. (In Russian)
12. Sholpo L.E. *Ispol'zovanie magnetizma gornyx porod dlya resheniya geologicheskikh zadach* [The Use of Rock Magnetism for Solving Geological Problems]. Leningrad, Nedra, 1977. 182 p. (In Russian)
13. Kruiver P.P., Dekkers M.J., Heslop D. Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetization. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, vol. 189, nos. 3–4, pp. 269–276. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00367-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00367-3).
14. 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. *ARPJ. Earth Sci.*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 1–6.
15. Burov B.V., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. *Paleomagnetnyi analiz* [Paleomagnetic Analysis]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 1986. 167 p. (In Russian)
16. Blytt A.G. Forsøg til en Theorie om Indvandringen af Norges Flora under vekslede regnfulde og tørre Tider. *Nyt Mag. Naturvidensk.*, 1876, Bd. 21, H. 4, S. 279–362. (In Danish)
17. Blytt A.G. *Essay on the Immigration of the Norwegian Flora during Alternating Rainy and Dry Periods*. Christiania, Alb. Cammermayer, 1876. 89 p.
18. Sernander R. *Studier öfver den Götländska vegetationens utvecklingshistora: Akad. afh.* Uppsala, Nya Tidnings Aktie-Bolags Tr., 1894. 112 s. (In Swedish)
19. Ravazzi C. An overview of the Quaternary continental stratigraphic units based on biological and climatic events in Italy. *Il Quaternario. Ital. J. Quat. Sci.* 2003, vol. 16, no. 1, pp. 11–18.
20. Krainov M.A., Bezrukova E.V., Kerber E.V., Levina O.V., Ivanov E.V., Shchetnikov A.A., Filinov I.A. First results of study of Lake Baunt bottom sediments (northern Transbaikalia). *Russ. Geol. Geophys.*, 2017, vol. 58, no. 11, pp. 1401–1411. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.02.005>.
21. Steffensen J.P. The size distribution of microparticles from selected segments of the Greenland Ice Core Project ice core representing different climatic periods. *J. Geophys. Res.: Oceans*, 1997, vol. 102, no. C12, pp. 26755–26763. <https://doi.org/10.1029/97JC01490>.
22. Simonsen M.F., Baccolo G., Blunier T., Borunda A., Delmonte B., Frei R., Goldstein S., Grinsted A., Kjär H.A., Sowers T., Svensson A., Vinther B., Vladimirova D., Winckler G., Winstrup M., Vallelonga P. East Greenland ice core dust record reveals timing of Greenland ice sheet advance and retreat. *Nat. Commun.*, 2019, vol. 10, no. 1, art. 4494. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12546-2>.
23. Subetto D.A. *Donnye otlozheniya ozer: paleolimnologicheskie rekonstruktsii* [Lake Sediments. Paleolimnological Reconstructions]. St. Petersburg, Izd. RGPU im. A.I. Gertsena, 2009. 343 p. (In Russian)

24. Snowball I.F. Magnetic hysteresis properties of greigite (Fe_3S_4) and a new occurrence in Holocene sediments from Swedish Lappland. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1991, vol. 68, nos. 1–2, pp. 32–40. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(91\)90004-2](https://doi.org/10.1016/0031-9201(91)90004-2).
25. Day R., Fuller M., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1977, vol. 13, no. 4, pp. 260–267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X).
26. Dunlop D.J. Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2002, vol. 107, no. B3, pp. EPM 4-1–EPM 4-22. <https://doi.org/10.1029/2001JB000486>.
27. Chang L., Roberts A.P., Tang Y., Rainford B.D., Muxworthy A.R., Chen Q. Fundamental magnetic parameters from pure synthetic greigite (Fe_3S_4). *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2008, vol. 113, no. B6, art. B06104. <https://doi.org/10.1029/2007JB005502>.
28. Dekkers M.J., Schoonen M.A.A. Magnetic properties of hydrothermally synthesized greigite (Fe_3S_4)–I. Rock magnetic parameters at room temperature. *Geophys. J. Int.*, 1996, vol. 126, no. 2, pp. 360–368. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb05296.x>.

Для цитирования: Косарева Л.Р., Нурғалиева Н.Г., Нурғалиев Д.К., Ли Х.-Ч., Крылов П.С., Кузина Д.М., Антоненко В.В. Предварительные магнитно-минералогические исследования неоплейстоцен-голоценовых осадков озера Тургойак // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 563–576. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.563-576>.

For citation: Kosareva L.R., Nurgalieva N.G., Nurgaliev D.K., Li H.-C., Krylov P.S., Kuzina D.M., Antonenko V.V. Preliminary magnetic mineralogical studies of the Neopleistocene-Holocene sediments from Lake Turgoyak. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 563–576. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.563-576>. (In Russian)

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.382.3

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.577-589

РАСЧЕТ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ БАРЬЕРОВ И БЛОКИРУЮЩИХ ТЕМПЕРАТУР МАЛЫХ ПСЕВДООДНОДОМЕННЫХ ЧАСТИЦ МЕТОДАМИ МИКРОМАГНЕТИЗМА

В.П. Щербаков, Н.К. Сычева

*Геофизическая обсерватория «Борок» Института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН, пос. Борок, 152742, Россия*

Аннотация

Выполнено численное моделирование процесса перемагничивания малых псевдооднодоменных частиц магнетита ($T_c = 580$ °С) цилиндрической формы высотой $h = 60\text{--}350$ нм и отношением высоты к диаметру, равным 1.29. Такая геометрия обеспечивает преимущественную анизотропию формы, так что в стабильном состоянии магнитный момент частицы направлен вдоль оси цилиндра. Показано, что с увеличением размера доменная структура трансформируется от однодоменного состояния (60 нм) к моде *flower* ($h = 70\text{--}85$ нм) и далее к вихревой структуре. Перемагничивание частиц при $h = 75\text{--}250$ нм осуществляется через вихревое состояние с осью, направленной вдоль их диаметра. В диапазоне $h = 300\text{--}350$ нм на вершине потенциального барьера доменная структура преобразуется из единичного вихря в мультивихревое состояние. Блокирующие температуры T_b частиц лежат в диапазоне 520–580 °С, при этом зависимость $T_b(h)$ носит немонотонный характер, образуя «яму» при $h = 90\text{--}140$ нм. Для $h = 300\text{--}350$ нм T_b расположены в непосредственной близости от T_c , отличаясь от T_c не более чем на один градус. Установлено, что уже при $h = 100$ нм отношение магнитной энергии во внешнем поле B порядка земного к тепловой энергии при $T = T_b$ достигает единицы, что говорит о сильной нелинейности зависимости термоостаточной намагниченности (TRM) от внешнего поля уже в столь малых полях и при малых размерах частиц. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости модификации микромагнитных моделей, применяемых в настоящее время, в сторону учета фактической формы и дефектности кристаллической структуры частиц для приведения их в соответствие со свойствами реальных ферромагнетиков, присутствующих в горных породах.

Ключевые слова: микромагнитное моделирование, магнетит, псевдооднодоменные частицы, потенциальный барьер, блокирующая температура.

Введение

Отличительным свойством термоостаточной намагниченности (TRM) является ее высокая интенсивность, приобретаемая в относительно слабом геомагнитном поле. Физический механизм, приводящий к такому поведению однодоменных (ОД) частиц, основан на термофлуктуационной модели преодоления потенциальных барьеров, препятствующих обращению вектора намагниченности. Термофлуктуационная модель TRM предполагает, что выше так называемой температуры блокировки T_b тепловые возбуждения поддерживают положения

термодинамического равновесия допустимых конфигураций, а ниже этой температуры их распределение постепенно замораживается.

Термофлуктуационная модель TRM для ОД частиц позволяет объяснить многие свойства TRM: высокую стабильность, законы независимости и аддитивности парциальных термоостаточных намагниченностей (pTRM) Телье. Для псевдооднодоменных (ПОД) и многодоменных (МД) зерен Neel [1] предположил, что действовавшие физические механизмы могут быть разделены на гистерезисные и термофлуктуационные вклады. Но ни гистерезисная, ни термофлуктуационная теории образования TRM не согласуются с наблюдениями, а также не могут объяснить зависимость интенсивности pTRM от термической предыстории. Подробный разбор достоинств и недостатков гистерезисной и термофлуктуационной моделей дан в работе [2]. Детальная физическая концепция теории TRM для ПОД и МД зерен требует учета переходов между различными доменными структурами (ДС) через энергетические барьеры при охлаждении или нагреве в слабом магнитном поле. Первым шагом в направлении построения физической теории TRM должен быть расчет энергетических барьеров E_b между локальными энергетическими минимумами (LEM), которые представляют различные конфигурации магнитных доменов. Теоретическое решение задачи нахождения пути между двумя заданными состояниями LEM с минимальными энергетическими затратами было предложено в работе [3], содержащей комбинацию метода упругой эластичной ленты и минимизацию свободной энергии (уравнение 1):

$$E = E_{\text{ex}} + E_{\text{an}} + E_{\text{d}}, \quad (1)$$

где обменная энергия

$$E_{\text{ex}} = A(T) \left[(\nabla \alpha_x)^2 + (\nabla \alpha_y)^2 + (\nabla \alpha_z)^2 \right], \quad (2)$$

энергия кристаллографической анизотропии

$$E_{\text{an}} = K_1(T) (\alpha_x^2 \alpha_y^2 + \alpha_x^2 \alpha_z^2 + \alpha_y^2 \alpha_z^2), \quad (3)$$

энергия размагничивающего поля

$$E_{\text{d}} = -\frac{1}{2} \mathbf{H}_d \boldsymbol{\alpha}. \quad (4)$$

Здесь $A(T)$ – обменная константа, $K_1(T)$ – константа анизотропии, T – температура, $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ – направляющие косинусы вектора спонтанной намагниченности с осями x, y, z . Внешнее магнитное поле во всех расчетах принималось равным нулю.

Позднее эта схема была численно реализована с использованием программного обеспечения (ПО) с открытым исходным кодом MERRILL [4], версия 1.3.5 (ПО доступно по адресу <https://www.rockmag.org>).

В работе представлены результаты микромагнитного моделирования ДС ПОД идеальных (бездефектных) частиц магнетита цилиндрической формы с высотой h , радиуса r и объема $v = \pi r^2 h$ с целью оценки величины потенциальных барьеров и блокирующих температур в зависимости от температуры T и размера частиц.

1. Методика расчетов

MERRILL поддерживает использование тетраэдрических конечных элементов и вычисление LEM магнитной доменной структуры. Для описания геометрии зерен модель частицы разбивается на тетраэдрические конечные элементы

произвольной формы с помощью дополнительного программного обеспечения с тем расчетом, чтобы полученная сетка была достаточно точной для учета распределения вектора намагниченности по объему частицы. Предельный размер элементарной ячейки ограничен так называемой «длиной обмена» [5]

$$l_{\text{ex}} = \sqrt{2A / (\mu_0 M_s^2)}$$

(μ_0 – магнитная постоянная) и зависит от природы ферромагнетика. Для магнетита при комнатной температуре величина «длины обмена» l_{ex} составляет 9–10 нм. В расчетах размер элементарной ячейки варьировали от 0.5 нм для $h = 60$ нм до 3 нм для $h = 300$ –350 нм. Намагниченность задавали в четырех вершинах каждой из элементарных ячеек и линейно интерполировали во всех других местах. Для поиска LEM в MERRILL используется метод конечных элементов [6]. По умолчанию MERRILL применяет ускоренный адаптивный алгоритм ступенчатого крутого спуска по энергетическому ландшафту, оптимизированный для микромагнетиков [7, 8]. Стандартный метод сопряженных градиентов также доступен.

Численные эксперименты проводили для бездефектных частиц магнетита цилиндрической формы при соотношении $h/2r = 1.29$, с осью цилиндра, вытянутой вдоль оси [001] и легкой осью магнитной анизотропии вдоль направления [111]. При расчетах использовали зависимость магнитных параметров от температуры, принятую в ПО MERRILL согласно [9–11] для обменной константы (Дж/м)

$$A(T) = \frac{(\sqrt{21622.526 + 816.476(T_c - T)} - 147.046)}{408.238 \times 10^{11}},$$

константы анизотропии (Дж/м³)

$$K_1(T) = -2.13074 \times 10^{-5} \times (T_c - T)^{3.2}$$

и намагниченности насыщения (А/м)

$$M_s(T) = 737.384 \times 51.876 \times (T_c - T)^{0.4}$$

где температура Кюри $T_c = 580$ °С [4]. Перед расчетом энергетических барьеров средствами MERRILL вычисляли LEM для заданной температуры путем минимизации E при начальном состоянии магнитных моментов элементарных ячеек вдоль легкой оси [111], на которые накладывались небольшие случайные возмущения. Полученная ДС была стартовым состоянием для расчета энергетических барьеров, конечное состояние – инверсия стартового состояния.

2. Результаты

Проведены расчеты потенциальных барьеров E_b , блокирующих температур T_b , магнитных моментов и получены ДС для частиц от $h = 60$ до 350 нм при температурах T от 20 до 575 °С. Величину потенциального барьера E_b определяли как разность энергии метастабильного стартового состояния и энергии наивысшей точки, ведущей в другое метастабильное (антипараллельное стартовому) состояние. Для $h = 60$ нм в течение всего процесса перемагничивания ДС неотличима от однодоменной (SD), поэтому перейдем сразу к описанию траектории перехода между антипараллельными структурами $flower+ \rightarrow flower-$ ($h = 70$ –85 нм), $SV+ \rightarrow SV-$ ($h = 90$ –350 нм). Аббревиатурой SV (*single vortex*) обозначена вих-

ревая структура с одним вихрем, «+» – стартовая структура, «-» – структура, антипараллельная стартовой. Необходимо отметить, что, поскольку частицы имеют вытянутую форму, в полученных в качестве стартовых структурах LEM вектор намагниченности \mathbf{M} направлен вдоль длинной оси [001] для SD и $flower$, а в структурах SV вдоль длинной оси [001] направлены (с возможным небольшим отклонением) как ось вихря, так и \mathbf{M} .

Для $h = 70$ нм переход от $flower+$ к $flower-$ происходит через структуру $flower_0$, где $flower_0$ означает структуру $flower$ с осью вдоль короткой оси (рис. 1). При росте размера, для $h = 75$ – 85 нм преодоление барьера происходит уже с образованием не $flower$, но вихря вдоль короткой оси: $flower+ \rightarrow SV_0 \rightarrow flower-$ (рис. 1).

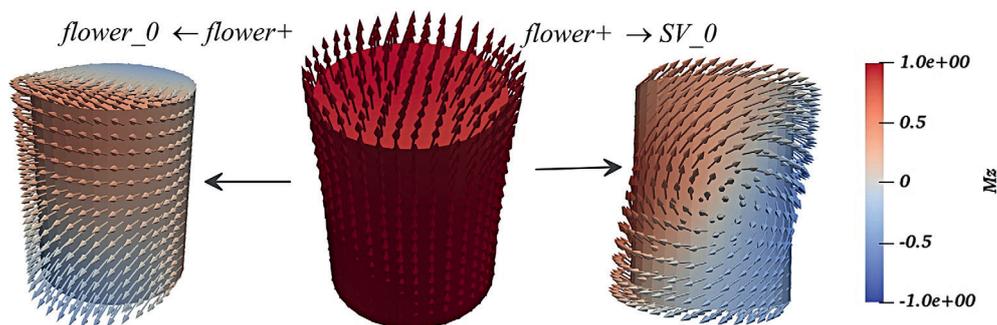


Рис. 1. Пример переходов $flower+ \rightarrow flower_0$ ($h = 70$ нм) и $flower+ \rightarrow SV_0$ ($h = 75$ нм). Цветовая шкала соответствует величине проекции вектора намагниченности на ось z

На рис. 2, *a* и *б* показано изменение энергии $E(i)$ и компонент вектора $\mathbf{M}(i)$ при $T = 0$ °C в процессе оптимального перехода для $h = 70$ и 100 нм. На этом и всех последующих рисунках i означает номер шага при последовательном расчете траектории ДС. Для размеров 90 – 100 нм в качестве стартовой структуры ($T = 20$ °C) получен $vortex$ с высоким значением проекции вектора намагниченности на ось [001] $M_z \approx 0.8$, (обозначим такую структуру аббревиатурой « SV », «слабый» $vortex$). Для $h = 90$ нм при повышении T до 150 °C в качестве стартового LEM получен $flower$. Такая стартовая ДС сохраняется вплоть до $T = 575$ °C. Для других размеров этого диапазона стартовая ДС $flower$ получена для более высоких температур.

Для локализации положения оси $vortex$ удобно ввести спиральность $H = \mathbf{M} \times \text{rot} \mathbf{M}$ [4, 12], величина которой растет с ростом закрутки (ротора) вектора \mathbf{M} , что как раз и происходит при приближении к оси $vortex$ (рис. 3). Последовательность изменений плотности параметра спиральности H наглядно демонстрирует, что перемагничивание при $h = 90$ – 115 нм происходит путем разворота оси $vortex$.

В интервале размеров $h = 120$ – 250 нм переход для антипараллельных структур осуществляется по схеме $SV+ \rightarrow SV_0 \rightarrow SV-$ по всему температурному интервалу. Пример такого перехода показан на рис. 4 для размера $h = 200$ нм при $T = 20$ °C. Естественно, начальная намагниченность здесь становится заметно ниже, $M_z \approx 0.1$ – 0.2 , а переворот осуществляется через изгиб первоначально вертикальной оси $vortex$ с последующим образованием конфигурации SV_0 .

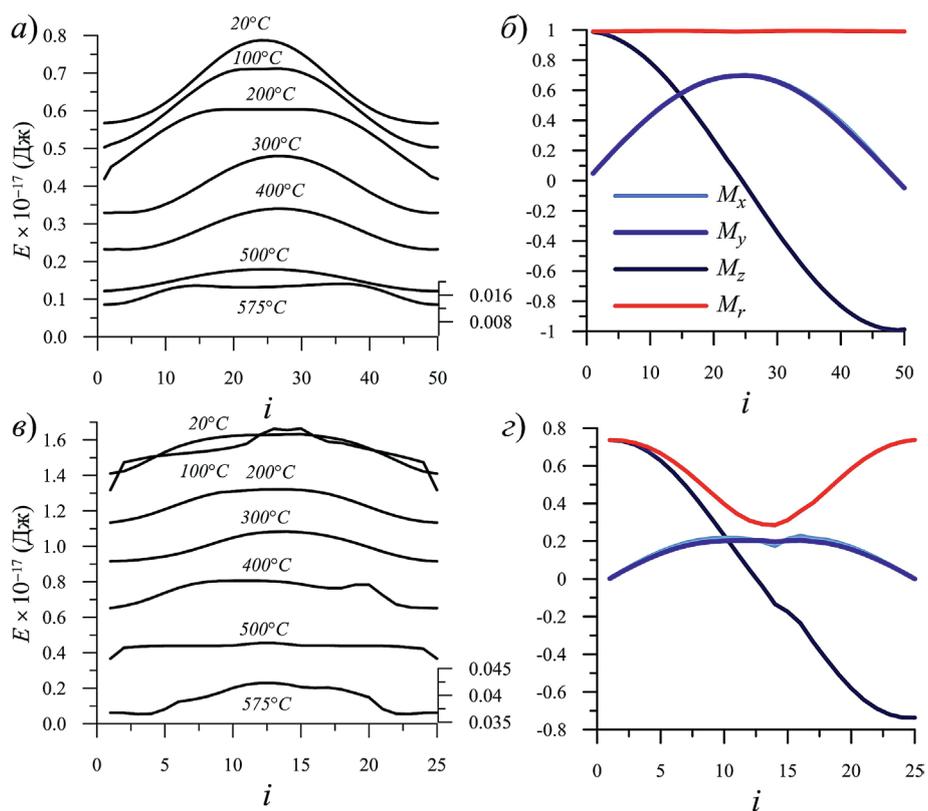


Рис. 2. Кривые изменения энергии $E(i)$ (а, в) и изменение компонент вектора $\mathbf{M}(i)$ при $T=20^\circ\text{C}$ (б, з) в процессе оптимального перехода $flower+ \rightarrow flower-$ для $h=70$ нм (а и б) и $h=100$ нм (в и з), i – номер шага при последовательном расчете траектории ДС

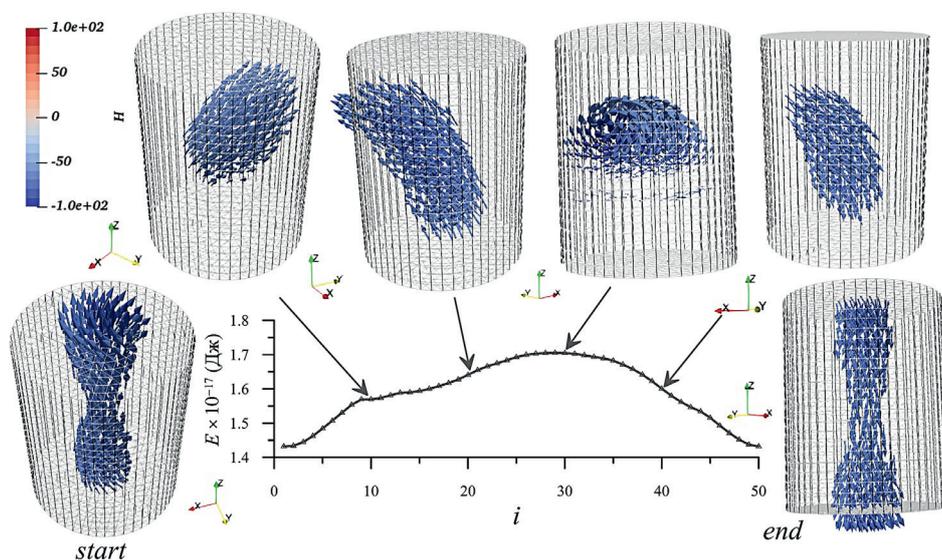


Рис. 3. $h=100$ нм, $T=20^\circ\text{C}$. В центре – график изменения энергии $E(i)$ в процессе оптимального перехода $SV+ \rightarrow SV-$. На рисунках вокруг графика показано распределение вектора намагниченности в области с высокой спиральностью $\mathbf{H} = \mathbf{M} \times \text{rot} \mathbf{M}$ в интервале условных единиц (от -100 до -60) (цветовая шкала)

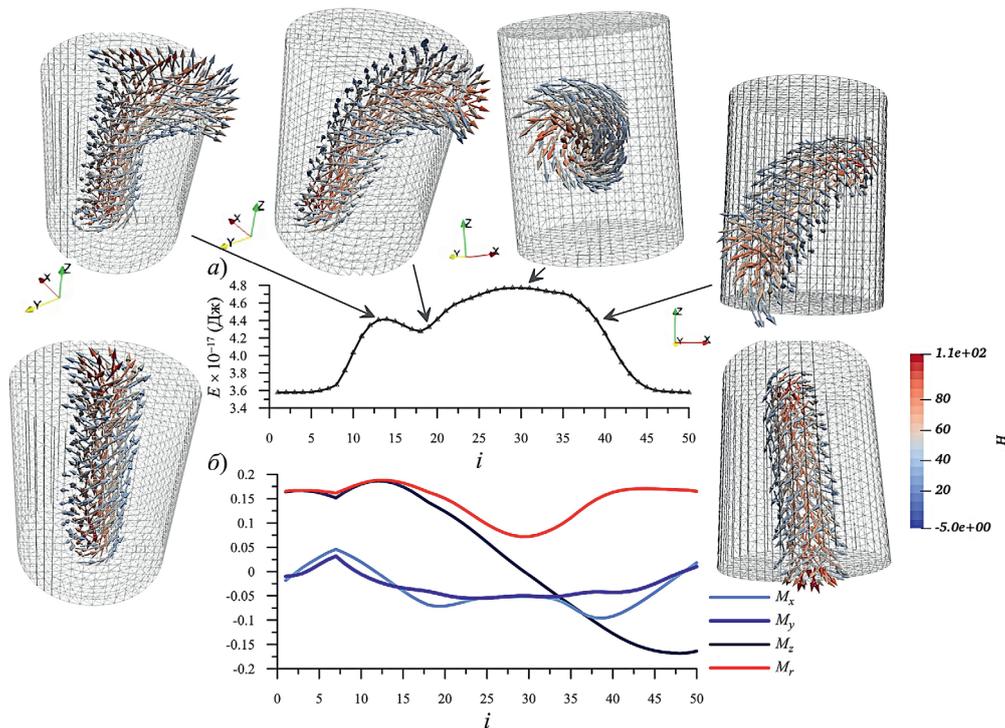


Рис. 4. $h = 200$ нм, $T = 20$ °С. а) График изменения $E(i)$ в процессе оптимального перехода $SV+ \rightarrow SV-$. На рисунках вокруг графика показано распределение вектора намагниченности в области с высокой спиральностью $H = \mathbf{M} \times \text{rot} \mathbf{M}$ в интервале условных единиц 40–110 (цветовая шкала); б) изменение компонент $\mathbf{M}(i)$ в процессе перехода

Для частиц с размерами $h = 300$ – 350 нм перемагничивание также начинается с изгиба первоначального квазивертикального вихря. На вершине потенциального барьера ДС образует уже мультивихревую структуру (MV), конфигурация которой зависит от температуры (рис. 5).

3. Обсуждение

На рис. 6 представлена обобщенная диаграмма траекторий переходов $flower(SD)+ \rightarrow flower(SD)-$, $wSV+ \rightarrow wSV-$ и $SV+ \rightarrow SV-$ от температуры и объема частицы h по результатам моделирования. Конкретные детали этих переходов были описаны выше, пунктирная линия на уровне 350 нм показывает предельное значение размера частиц, рассчитанное в данной работе.

На рис. 7, а приведена зависимость величины потенциального барьера E_b от температуры T для размеров $h = 70, 100, 200, 300$ нм. Для сравнения пунктиром представлена величина E_b для гипотетической ситуации, если бы магнитная конфигурация при всех размерах оставалась ОД. В этом случае (при преобладающей анизотропии формы) высоту потенциального барьера можно представить в виде уравнения 5 [13]:

$$E_b(T) = \frac{1}{2} \mu_0 N_d M_s^2(T) v, \quad (5)$$

где N_d – размагничивающий фактор.

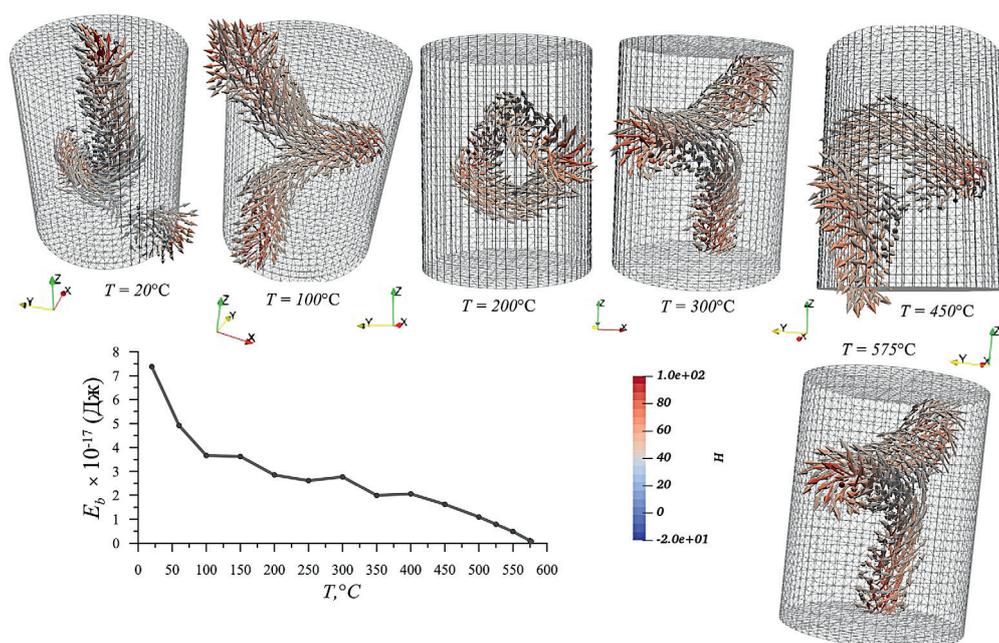


Рис. 5. $h = 300$ нм, зависимость высоты потенциального барьера E_b от температуры T и распределение магнитных моментов в области частицы с максимальной величиной спиралиности H (35–100) для $T = 20$ –575 °C

Для цилиндра с соотношением осей $h/2r = 1.29 N_d \approx 0.08$ [14], где $N_d = N_l - N_s$, $N_l \approx 0.39$ – размагничивающий фактор вдоль оси цилиндра, а $N_s \approx 0.31$ – это размагничивающий фактор вдоль диаметра цилиндра. Как видно, ОД приближение хорошо отображает поведение $E_b(T)$ при $h = 70$ нм, что ожидаемо, поскольку магнитная конфигурация при столь малом размере практически неотличима от ОД (небольшое различие в форме кривых $E_b(T)$ связано с тем, что уравнение (5) не учитывает вклада обменной энергии и энергии магнитной анизотропии. Однако, уже при $h = 100$ нм ОД это приближение дает ошибку в 100% (при $T < 300$ °C), а при увеличении h оно становится и вовсе неприменимым.

Блокирующая температура T_b определяется как температура, при которой время релаксации становится сравнимым с временем опыта, а при $T < T_b$ магнитный момент уже стабилен во времени. Такое «замораживание» магнитных моментов частиц и есть процесс образования термоостаточной намагниченности. Простая, но достаточно точная оценка T_b исходит из уравнения 6 [13, 15]:

$$kT_b \approx E_b / 25. \tag{6}$$

Соответственно, T_b определялась как точка пересечения графиков $E_b(T)$ и графика $E_b = 25kT$ (пример представлен на рис. 7, а).

Рис. 7, б демонстрирует рост отношения магнитной энергии $M_r M_s(T) \nu B$ во внешнем поле B порядка земного к тепловой энергии при $T = T_b$ с ростом размера h . Как видно, это отношение достигает 1 при $h = 100$ нм, что говорит о сильной нелинейности зависимости $TRM(B)$ уже в столь малых полях и малых размерах частиц.

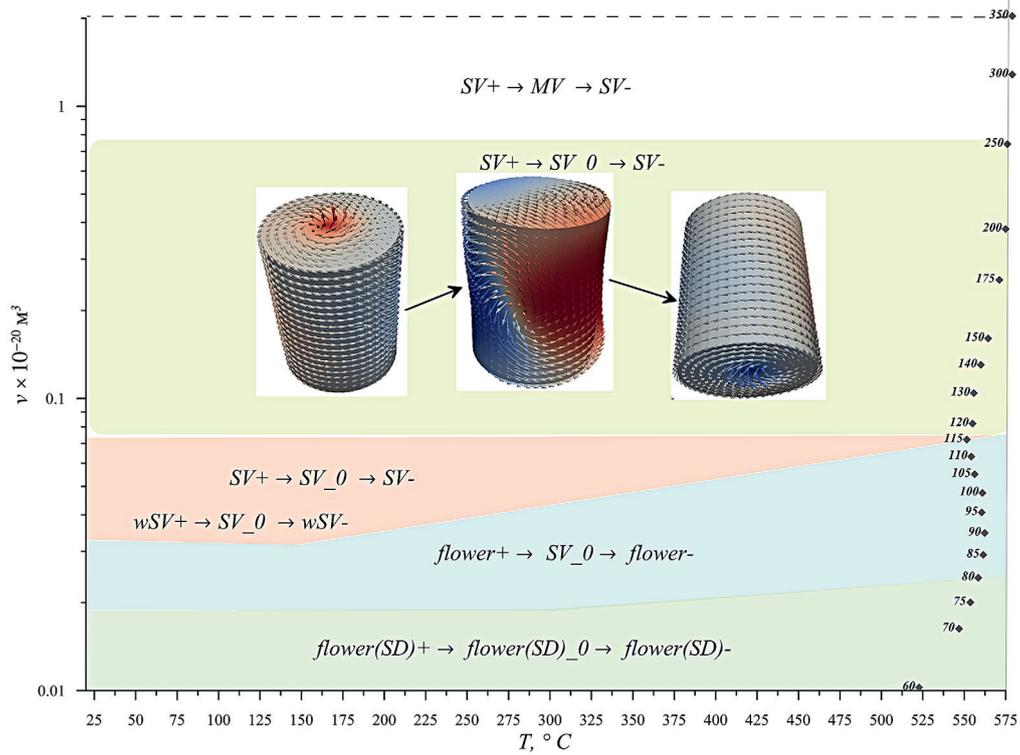


Рис. 6. Зависимость траектории переходов $flower(SD)+ \rightarrow flower(SD)-$, $wSV+ \rightarrow wSV-$ и $SV+ \rightarrow SV-$ от температуры и объема частицы h по результатам моделирования. Ромбами отмечено значение блокирующей температуры, метки у ромбов означают размер частицы h в нм

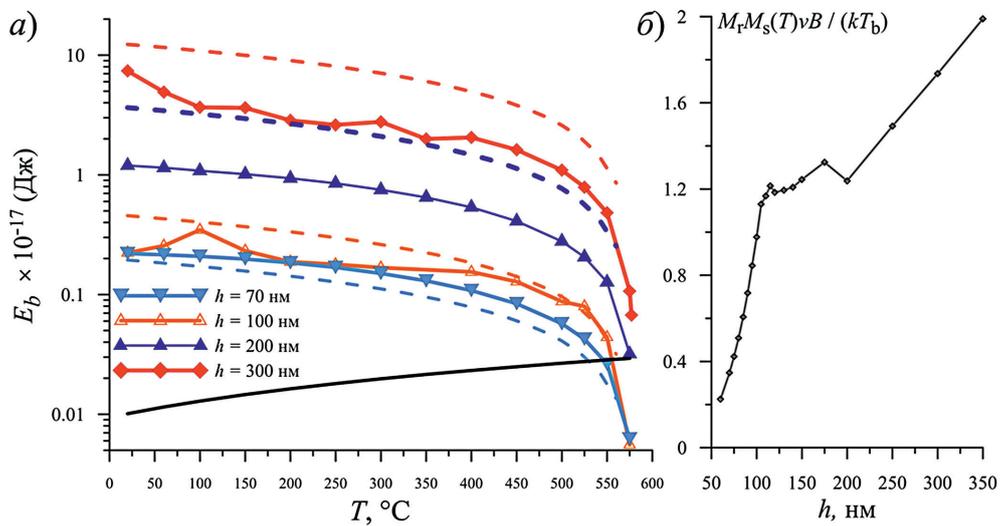


Рис. 7. а) Зависимость высоты потенциального барьера E_b от температуры T для $h = 70, 100, 200, 300$ нм, пунктирными линиями показана высота потенциального барьера, рассчитанная по формуле (5); б) зависимость $M_f M_s(T) v B$ от размера частицы h , внешнее поле $B = 50$ мкТл

На рис. 8, *a* представлена полученная по результатам расчетов зависимость блокирующей температуры от объема магнетитовых частиц цилиндрической формы, пунктиром выделен интервал размеров частиц 85–115 нм переходной зоны *flower* → *SV*, так называемая зона магнитно-нестабильных частиц [12], где в нашем случае наблюдается снижение блокирующей температуры относительно T_b более мелких зерен. Нестабильность этой зоны определяется тем, что в ней, как уже отмечено выше, в зависимости от температуры и размера частицы преодоление барьера может происходить по схемам *flower+* → *SV_0* → *flower-*, *wSV+* → *SV_0* → *wSV-*, *SV+* → *SV_0* → *SV-*.

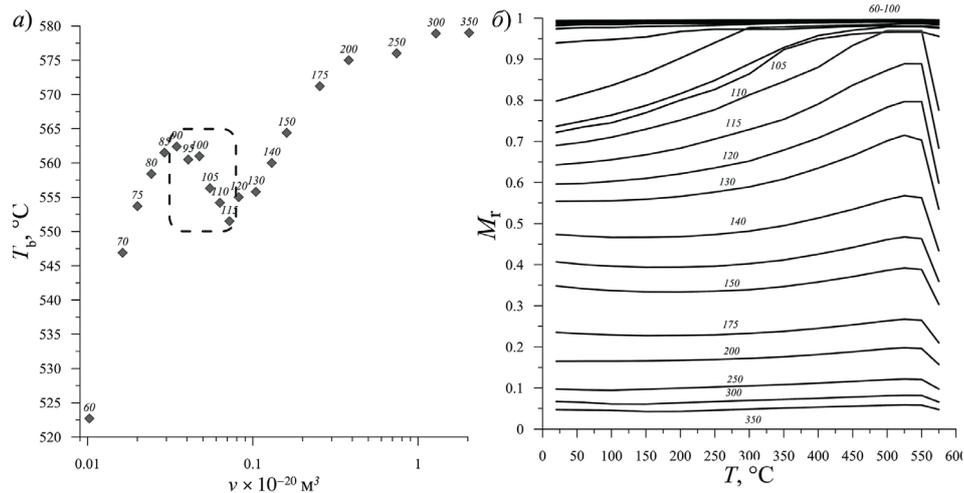


Рис. 8. *a*) Зависимость блокирующей температуры от объема магнетитовых частиц цилиндрической формы по результатам расчетов, метки у ромбов означают высоту цилиндра в нм; *б*) зависимость остаточного магнитного момента частицы от температуры (начальное состояние, *SD+*, *flower+*, *wSV+* или *SV+*) для разных размеров частиц (цифры у линий означают высоту цилиндра в нм)

Для частиц размерами $h = 250$ – 350 нм значения T_b , полученные вышеописанным способом, находятся в непосредственной близости от T_c (для $h = 250$ нм $T_b = 576$ °C, для $h = 300$ нм $T_b = 578.9$ °C, $h = 350$ нм $T_b = 579$ °C). Рис. 8, *б* демонстрирует зависимость относительного полного магнитного момента M_r частицы от ее размера и температуры. Как видно из рисунка, M_r довольно слабо зависит от температуры, величина же его постепенно снижается от 1 до 0.05 при росте h от 60 до 350 нм.

Заключение

По результатам расчета ДС структуры малых ПОД частиц магнетита цилиндрической формы с отношением высоты h к диаметру, равным 1.29, установлено, что для $h = 60$ нм в силу преимущественной анизотропии формы в стабильном состоянии магнитный момент частицы направлен вдоль оси цилиндра, при $h = 70$ – 85 нм образуется мода *flower*, а в диапазоне $h = 90$ – 350 нм – вихревая структура. Рассчитан потенциальный барьер между двумя противоположными направлениями магнитных моментов. На основе этих расчетов оценены блокирующие температуры частиц и показано, что зависимость $T_b(h)$ носит немонотонный характер. Рассчитанное отношение магнитной энергии частиц

размером выше 120 нм во внешнем поле $B = 50$ мкТл к тепловой энергии при $T = T_b$ указывает на сильную нелинейность зависимости $\text{TRM}(B)$.

Полученные результаты в значительной мере расходятся с известными экспериментальными данными, свидетельствующими о достаточно широком спектре блокирующих температур и линейности зависимости $\text{TRM}(B)$ в горных породах. Такие противоречия говорят о несовершенстве применяемых микромагнитных моделей и необходимости их модификации. В частности, для получения результатов, согласующихся со свойствами природных ферритмагнетиков, необходимо учитывать форму и дефекты кристаллической структуры частиц, а также магнитостатическое взаимодействие и химическую неоднородность природного магнетита.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00112, <http://rscf.ru/project/23-17-00112/> (ВПЦ) и Госпрограммы ГО «Борок» ИФЗ РАН (НКС).

Литература

1. Néel L. Some theoretical aspects of rock-magnetism // *Adv. Phys.* 1955. V. 4, No 14. P. 191–243. <https://doi.org/10.1080/00018735500101204>.
2. Shcherbakov V.P., Shcherbakova V.V. On suitability of the Thellier method of paleointensity determinations to pseudosingledomain and multidomain grains // *Geophys. J. Int.* 2001. V. 146, No 1. P. 20–30. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01421.x>.
3. Fabian K., Shcherbakov V.P. Energy barriers in three-dimensional micromagnetic models and the physics of thermoviscous magnetization // *Geophys. J. Int.* 2018. V. 215, No 1. P. 314–324. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy285>.
4. Ó Conbhúí P., Williams W., Fabian K., Ridley P., Nagy L., Muxworthy A.R. MERRILL: Micromagnetic earth related robust interpreted language laboratory // *Geochem. Geophys., Geosyst.* 2018. V. 19, No 4. P. 1080–1106. <https://doi.org/10.1002/2017GC007279>.
5. Rave W., Fabian K., Hubert A. Magnetic states of small cubic particles with uniaxial anisotropy // *J. Magn. Magn. Mater.* 1998. V. 190, No 3. P. 332–348. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(98\)00328-X](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(98)00328-X).
6. Davies A.J. *The Finite Element Method: An Introduction with Partial Differential Equations*. 2nd ed. Cary: Oxford Univ. Press, 2011. 320 p.
7. Berkov D. Numerical calculation of the energy barrier distribution in disordered many-particle systems: The path integral method // *J. Magn. Magn. Mater.* 1998. V. 186, No 1–2. P. 199–213. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(98\)00078-X](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(98)00078-X).
8. Berkov D. Evaluation of the energy barrier distribution in many-particle systems using the path integral approach // *J. Phys.: Condens. Matter.* 1998. V. 10, No 5. P. L89–L95. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/10/5/002>.
9. Heider F., Williams W. Note on temperature dependence of exchange constant in magnetite // *Geophys. Res. Lett.* 1988. V. 15, No 2. P. 184–187. <https://doi.org/10.1029/GL015i002p00184>.
10. Fletcher E.J., O'Reilly W. Contribution of Fe^{2+} ions to the magnetocrystalline anisotropy constant K_1 of $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ ($0 < x < 0.1$) // *J. Phys. C: Solid State Phys.* 1974. V. 7, No 1. P. 171–178. <https://doi.org/10.1088/0022-3719/7/1/024>.
11. Heider F., Dunlop D.J., Sugiura N. Magnetic properties of hydrothermally recrystallized magnetite crystals // *Science*. 1987. V. 236, No 4806. P. 1287–1290. <https://doi.org/10.1126/science.236.4806.1287>.

12. Wang Y., Ge K., Williams W., Zhou H., Wang H., Nagy L., Tauxe L., Wang J., Liu S., Liu Y. Micromagnetic modeling of a magnetically unstable zone and its geological significances // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2022. V. 127, No 9. Art. e2022JB024876. <https://doi.org/10.1029/2022JB024876>.
13. *Нагата Т.* Магнетизм горных пород. М.: Мир, 1965. 348 с.
14. Prozorov R., Kogan V.G. Effective demagnetizing factors of diamagnetic samples of various shapes // *Phys. Rev. Appl.* 2018. V. 10, No 1. Art. 014030. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.014030>.
15. Shcherbakov V.P., Lhuillier F., Sycheva N.K. Exact analytical solutions for kinetic equations describing thermochemical remanence acquisition for single-domain grains: Implications for absolute paleointensity determinations // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2021. V. 126, No 5. Art. e2020JB021536. <https://doi.org/10.1029/2020JB021536>.

Поступила в редакцию 17.10.2023

Принята к публикации 25.11.2023

Щербаков Валерий Прохорович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории палеомагнетизма и физико-химических свойств горных пород

Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

пос. Борок, д. 142, Некоузский район, Ярославская область, 152742, Россия

E-mail: shcherbakovv@list.ru

Сычева Наталия Константиновна, кандидат физико-математических наук, заместитель директора, старший научный сотрудник лаборатории палеомагнетизма и физико-химических свойств горных пород

Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

пос. Борок, д. 142, Некоузский район, Ярославская область, 152742, Россия

E-mail: sycheva@borok.yar.ru

ISSN 2542-064X (Print)

ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2023, vol. 165, no. 4, pp. 577–589

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.577-589

**Calculation of Potential Barriers and Blocking Temperatures
of Small Pseudo–Single-Domain Particles by Micromagnetism Methods**

V.P. Shcherbakov *, *N.K. Sycheva* **

*Borok Geophysical Observatory, Schmidt Institute of Physics of the Earth,
Russian Academy of Sciences, Borok, 152742 Russia*

E-mail: *shcherbakovv@list.ru, **sycheva@borok.yar.ru

Received September 21, 2023; Accepted October 25, 2023

Abstract

Numerical simulation of the process of remagnetization of small pseudo–single-domain magnetite particles ($T_c = 580^\circ\text{C}$) was performed. The particles are cylindrical in shape, with a height h of 60–350 nm

and a height-to-diameter ratio of 1.29. This geometry enables preferential anisotropy of the shape, causing the magnetic moment of the particle to align along the cylinder's axis in a stable state. As the size increases, the domain structure shifts from the single-domain state (60 nm) to the *flower* mode ($h = 70\text{--}85$ nm), and then to a *vortex* structure. Particles in the range of $h = 75\text{--}250$ nm are remagnetized through a *vortex* state, with the axis aligned along their diameter. In the range of $h = 300\text{--}350$ nm, at the top of the potential barrier, the domain structure transforms from a single *vortex* to a *multi-vortex* configuration. The blocking temperatures T_b of the particles vary from 520 to 580°C, while the dependence $T_b(h)$ is non-monotonic and manifests a "pit" at $h = 90\text{--}140$ nm. At the same time, at $h = 300\text{--}350$ nm, T_b values differ from T_c by no more than 1°C. At $h = 100$ nm, the ratio of magnetic energy in the external field B of the order of the earth to thermal energy at $T = T_b$ reaches 1. This suggests a strong nonlinearity of the TRM(B) dependence even in such small fields and particle sizes. The results obtained highlight the need to revise the existing micromagnetic models by taking into account the specific shape and deficiency of the crystal structure of particles in order to bring them in line with the properties of actual ferrimagnets present in rocks.

Keywords: micromagnetic modeling, magnetite, pseudodomain particles, potential barrier, blocking temperature

Acknowledgements. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-17-00112, <http://rscf.ru/project/23-17-00112/> (VPS)) and the State Program for the Borok Geophysical Observatory, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences (NKS).

Figure Captions

- Fig. 1. Example of the transitions $flower+ \rightarrow flower_0$ ($h = 70$ nm) and $flower+ \rightarrow SV_0$ ($h = 75$ nm). The color scale corresponds to the magnitude of the magnetization projection on the z axis.
- Fig. 2. Energy trajectories $E(i)$ (a, c) and the components of the vector $\mathbf{M}(i)$ at $T = 20$ °C (b, d) during the optimal transition $flower+ \rightarrow flower-$ for $h = 70$ nm (a and b) and $h = 100$ nm (c and d), i is the step number for the sequential calculation of the DS trajectory.
- Fig. 3. $h = 100$ nm, $T = 20$ °C. The graph in the center displays the $E(i)$ curves during the optimal transition $SV+ \rightarrow SV-$. The figures around the graph show the distribution of the magnetization vector in the region with high helicity $H = \mathbf{M} \times \text{rot} \mathbf{M}$ in the range of conventional units (from -100 to -60) (color scale).
- Fig. 4. $h = 200$ nm, $T = 20$ °C. a) Graph of the energy change $E(i)$ during the optimal transition $SV+ \rightarrow SV-$. The figures around the graph show the distribution of the magnetization vector in the region with high helicity $H = \mathbf{M} \times \text{rot} \mathbf{M}$ in the interval of conventional units $40\text{--}110$ (color scale); b) the variations of the $\mathbf{M}(i)$ components during the transition.
- Fig. 5. $h = 300$ nm, the dependence of the height of the potential barrier E_b on the temperature T and the distribution of magnetic moments in the region of the particle with the maximum helicity value H ($35\text{--}100$) for $T = 20\text{--}575$ °C.
- Fig. 6. Dependence of the transition path $flower(SD)+ \rightarrow flower(SD)-$, $wSV+ \rightarrow wSV-$, and $SV+ \rightarrow SV-$ on the temperature and volume of the particle h according to the simulation results. The diamonds indicate the value of the blocking temperature, the marks next to the diamonds show the particle size h , nm.
- Fig. 7. a) Dependence of the height of the potential barrier E_b on the temperature T for $h = 70, 100, 200$, and 300 nm, the dashed lines show the height of the potential barrier calculated by formula (5); b) dependence $M_r M_s(T) v B / (k T_b)$ on the height of the cylindrical particle h , the external field $B = 50$ μ T.
- Fig. 8. a) Dependence of the blocking temperature on the volume of cylindrical magnetite particles according to the results of calculations, the marks next to the diamonds show the height of the cylinder, nm; b) dependence of the residual magnetic moment of the particle on the temperature (initial state, $SD+$, $flower+$, $wSV+$, or $SV+$) for different particle sizes (the numbers above the lines indicate the cylinder height, nm).

References

1. Néel L. Some theoretical aspects of rock-magnetism. *Adv. Phys.*, 1955, vol. 4, no. 14, pp. 191–243. <https://doi.org/10.1080/00018735500101204>.

2. Shcherbakov V.P., Shcherbakova V.V. On suitability of the Thellier method of paleointensity determinations to pseudosingledomain and multidomain grains. *Geophys. J. Int.*, 2001, vol. 146, no. 1, pp. 20–30. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01421.x>.
3. Fabian K., Shcherbakov V.P. Energy barriers in three-dimensional micromagnetic models and the physics of thermoviscous magnetization. *Geophys. J. Int.*, 2018, vol. 215, no. 1, pp. 314–324. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy285>.
4. Ó Conbhuí P., Williams W., Fabian K., Ridley P., Nagy L., Muxworthy A.R. MERRILL: Micromagnetic earth related robust interpreted language laboratory. *Geochem. Geophys., Geosyst.*, 2018, vol. 19, no. 4, pp. 1080–1106. <https://doi.org/10.1002/2017GC007279>.
5. Rave W., Fabian K., Hubert A. Magnetic states of small cubic particles with uniaxial anisotropy. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1998, vol. 190, no. 3, pp. 332–348. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(98\)00328-X](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(98)00328-X).
6. Davies A.J. *The Finite Element Method: An Introduction with Partial Differential Equations*. 2nd ed. Cary, NC, Oxford University Press, 2011. 320 p.
7. Berkov D. Numerical calculation of the energy barrier distribution in disordered many-particle systems: The path integral method. *J. Magn. Magn. Mater.*, 1998, vol. 186, nos. 1–2, pp. 199–213. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(98\)00078-X](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(98)00078-X).
8. Berkov D. Evaluation of the energy barrier distribution in many-particle systems using the path integral approach. *J. Phys.: Condens. Matter*, 1998, vol. 10, no. 5, pp. L89–L95. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/10/5/002>.
9. Heider F., Williams W. Note on temperature dependence of exchange constant in magnetite. *Geophys. Res. Lett.*, 1988, vol. 15, no. 2, pp. 184–187. <https://doi.org/10.1029/GL015i002p00184>.
10. Fletcher E.J., O'Reilly W. Contribution of Fe²⁺ ions to the magnetocrystalline anisotropy constant K₁ of Fe_{3-x}Ti_xO₄ (0 < x < 0.1). *J. Phys. C: Solid State Phys.*, 1974, vol. 7, no. 1, pp. 171–178. <https://doi.org/10.1088/0022-3719/7/1/024>.
11. Heider F., Dunlop D.J., Sugiura N. Magnetic properties of hydrothermally recrystallized magnetite crystals. *Science*, 1987, vol. 236, no. 4806, pp. 1287–1290. <https://doi.org/10.1126/science.236.4806.1287>.
12. Wang Y., Ge K., Williams W., Zhou H., Wang H., Nagy L., Tauxe L., Wang J., Liu S., Liu Y. Micromagnetic modeling of a magnetically unstable zone and its geological significances. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2022, vol. 127, no. 9, art. e2022JB024876. <https://doi.org/10.1029/2022JB024876>.
13. Nagata T. *Magnetizm gornyykh porod* [Rock Magnetism]. Moscow, Mir, 1965. 348 p. (In Russian)
14. Prozorov R., Kogan V.G. Effective demagnetizing factors of diamagnetic samples of various shapes. *Phys. Rev. Appl.*, 2018, vol. 10, no. 1, art. 014030. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.014030>.
15. Shcherbakov V.P., Lhuillier F., Sycheva N.K. Exact analytical solutions for kinetic equations describing thermochemical remanence acquisition for single-domain grains: Implications for absolute paleointensity determinations. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2021, vol. 126, no. 5, art. e2020JB021536. <https://doi.org/10.1029/2020JB021536>.

⟨ Для цитирования: Щербakov В.П., Сычева Н.К. Расчет потенциальных барьеров и блокирующих температур малых псевдооднодоменных частиц методами микроматне- тизма // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 577–589. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.577-589>. ⟩

⟨ For citation: Shcherbakov V.P., Sycheva N.K. Calculation of potential barriers and blocking temperatures of small pseudo-single-domain particles by micromagnetism methods. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 577–589. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.577-589>. (In Russian) ⟩

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.384

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.590-605

ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ ГРАНИЦЫ ПЕРМИ-ТРИАСА ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ (ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКАЯ ПЛАТФОРМА, ВОЛГО-УРАЛЬСКАЯ АНТЕКЛИЗА)

А.М. Фетисова^{1,2}, *Р.В. Веселовский*^{1,2}, *В.К. Голубев*³

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, 119234, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, 123242, Россия

³Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, г. Москва, 117647, Россия

Аннотация

В статье представлены результаты детальных палеомагнитных исследований пяти разрезов осадочных пород пограничного пермо-триасового возраста, расположенных в юго-восточной части Волго-Уральской антеклизы Восточно-Европейской платформы (Оренбургская область) – Боевая гора, Вязовка, Самбулак, Красногор и Воздвиженка. Характер магнитной текстуры, определяемый анизотропией магнитной восприимчивости, свидетельствует о накоплении пород в условиях активной гидродинамики и позволяет реконструировать преимущественно субмеридиональный снос обломочного материала. Направление характеристической компоненты намагниченности имеет биполярное распределение для пород разреза Боевая гора, а в остальных разрезах соответствует обратной полярности. Для пород разреза Вязовка методом E/I выполнена оценка коэффициента занижения наклона ($f = 0.79$). Положительный региональный тест складки свидетельствует о том, что дислокация пород изученных разрезов имела место после их накопления. Вычислены палеомагнитные (виртуальные геомагнитные) полюсы для каждого разреза, при этом наиболее надежными являются полюсы Боевая гора и Вязовка. Координаты среднего палеомагнитного полюса, вычисленного для изученных разрезов, за исключением разреза Самбулак, составляют: $slat = 51.7^\circ$, $slong = 55.8^\circ$, $n = 4$, $plat = 48.5^\circ$, $plong = 173.4^\circ$, $\alpha_{95} = 3.4^\circ$, $paleolat = 23.4^\circ$.

Ключевые слова: палеомагнетизм, Восточно-Европейская платформа, пермь, триас, палеомагнитный полюс, Оренбургская область.

Введение

Кривая кажущейся миграции палеомагнитного полюса (КМП) Восточно-Европейской платформы (ВЕП) для интервала геологического времени поздняя пермь – ранний триас является важной составляющей при проведении палеотектонических реконструкций Лавразии на границе палеозоя и мезозоя. Кривая КМП «стабильной» Европы для данного интервала времени основана на полюсах, полученных по объектам в пределах Западной Европы [1]. Однако в центральной части ВЕП, в пределах Русской плиты, имеется значительное количество разрезов пограничных пермо-триасовых осадочных толщ, палеомагнитные определения по которым могут существенно пополнить выборку

полюсов для построения кривой КМП ВЕП. Детализация и повышение надежности кривой КМП позволят оценить масштаб возможных пост-палеозойских относительных перемещений ВЕП и Сибирской платформы, на которые неоднократно указывали многие исследователи (например, [2]). По терригенному пермо-триасовому комплексу центральной и северной частей Русской плиты в последние годы были получены новые, отвечающие современным критериям качества палеомагнитные полюсы [3–6]. По южной части Русской плиты современные данные представлены в работе [7], однако полученные полюсы имеют явную удаленность от кривой КМП ВЕП для 240–260 млн лет, что требует проверки указанных палеомагнитных определений. В связи с этим в рамках данной работы приводятся новые палеомагнитные данные по пяти разрезам пермо-триасовых терригенных пород – Боевая гора, Вязовка, Самбулак, Воздвиженка и Красногор, расположенным в юго-восточной части Волго-Уральской антеклизы Восточно-Европейской платформы на территории Оренбургской области.

1. Объекты исследований

Пограничные пермо-триасовые разрезы Оренбургской области сложены преимущественно красноцветными континентальными терригенными отложениями. Как правило, это глины, алевролиты, разномеристые песчаники и конгломераты, редко встречаются прослой мергелей. Согласно работам [8, 9], все изученные разрезы по генезису связаны с постоянными водными потоками и представляют собой пойменные или русловые отложения. При изучении разрезов и установлении возраста пород использованы описания из работ [7–11], а также собственные полевые наблюдения. Координаты разрезов представлены в системе WGS-84.

Разрез **Боевая гора** расположен недалеко от г. Соль-Илецк, в районе пос. Боевая Гора (51.3009°N, 54.9025°E) (рис. 1). Отбор штуфов производился в овраге Корольки, начиная от цирка диаметром 10 м, примерно на 800 м выше устья. В ходе работы было опробовано 12 слоев. Верхние 7 слоев сложены фиолетово-коричневыми и красно-коричневыми песчаниками разномеристыми, глинами и алевролитами копанской свиты вохминского горизонта нижнего триаса [7, 10]. Нижележащие отложения представлены красно-коричневой глиной с прослоями алевролита и песчаника кульчумовской свиты верхневятского подъяруса верхней перми. Породы залегают полого, азимут падения СЗ 296–301°, угол падения 7–11°. Мощность опробованной части разреза ~20 м. Коллекция составила 149 ориентированных палеомагнитных штуфов.

Разрез **Вязовка** находится в 0.6 км на северо-восток от д. Вязовка, на правом склоне оврага Вязовский, частично на территории заброшенного карьера (51.7108°N, 55.8021°E) (рис. 1). Отбор производился из стенок в разных частях склона. Породы залегают моноклинально, азимут падения СЗ 280–310°, угол падения 6–13°. Породы представлены красноцветными глинами, алевролитами и песчаниками с редкими прослоями гравелитов и конгломератов, принадлежат кульчумовской свите верхневятского подъяруса верхней перми [9, 11]. В сумме из ~20 метров разреза было отобрано 170 штуфов.

Разрез **Самбулак** расположен северо-западнее Саракташа, на правом берегу р. Сакмара, в 5 км ниже по течению от с. Кульчумово (51.8810°N, 56.2123°E) (рис. 1). Разрез сложен верхнепермско-нижнетриасовыми осадочными горными породами кульчумовской и копанской свит [9, 11]. Копанская свита представлена крупногалечными конгломератами с прослоями крупнозернистых песчаников, кульчумовская свита – красно-коричневыми глинами, алевролитами и песчаниками с прослоями мелкогалечных конгломератов. Азимут падения толщи ЗЮЗ 251°, угол падения 11°. Отбор штуфов производился из пермской части разреза (кульчумовская свита) на 1.65 м ниже бронирующей пачки конгломератов копанской свиты, мощность опробованной части – 10 м, коллекция составила 34 штуфа.

Разрез **Красногор** расположен в 1.3 км западнее д. Красногор на правом берегу р. Урал (51.5600°N, 56.0936°E) (рис. 1), сложен в основании коричневыми глинами, алевролитами и песчаниками, в кровле – светло-коричневым песчаником с прослоями конгломерата. В данном месте на дневную поверхность выходят кульчумовская свита вятского яруса верхней перми и копанская свита вохминского горизонта нижнего триаса [7]. К какой части разреза относится опробованный интервал, не ясно. Азимут падения толщи ЗСЗ 279°, угол 29°. Из 4 м разреза отобран 21 ориентированный штуф.

Разрез **Воздвиженка** расположен в овраге Листрат (левобережье р. Сакмара), в 5.5 км юго-западнее с. Воздвиженка (51.7106°N, 56.3827°E) (рис. 1), в основании сложен коричневыми песчаниками предположительно кульчумовской свиты верхней перми, верхи разреза бронируются пачкой конгломератов копанской (?) свиты нижнего триаса [7]. Залегание пород пологое (13°) с падением на ЗЮЗ (251°). Палеомагнитная коллекция составила 18 штуфов, представляющих 14-метровую толщ.

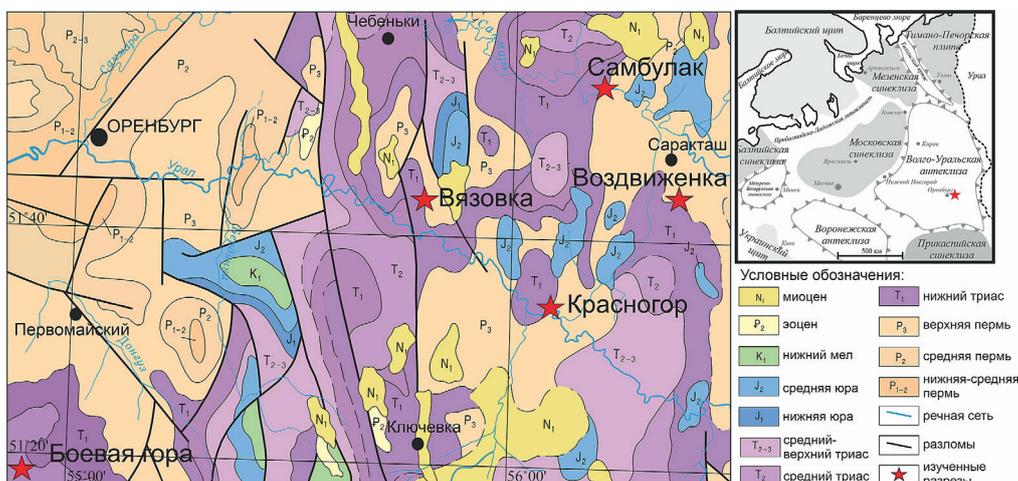


Рис. 1. Геологическая схема района исследований, выполненная на основе Государственной геологической карты Российской Федерации, масштаб 1:1000000 (третье поколение), серия: Уральская, лист М-40 (Оренбург), и расположение изученных разрезов.

2. Методы исследований

Полевые и лабораторные исследования, обработка и интерпретация результатов выполнялись по стандартной методике, общепринятой при проведении палеомагнитных исследований [12, 13]. Отбор ориентированных штуфов производился вручную, при помощи геологического молотка и ножа, ориентировка образцов осуществлялась горным компасом с учетом местного склонения согласно модели IGRF (13-е поколение). Из штуфов выпиливалось 1–3 палеомагнитных образца с ребром ~2 см, расположенных один над другим. Магнитные чистки палеомагнитных коллекций проводились в Центре коллективного пользования ИФЗ РАН [14] на криогенном (SQUID) магнитометре (2G Enterprises, США) и в петромагнитной лаборатории геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на спин-магнитометре JR-6 (AGICO, Чехия). Размагничивание образцов производилось в немагнитных печах MMTD-80 (Magnetic Measurements, Англия) и TD48 (ASC Scientific, США); часть образцов была размагничена переменным магнитным полем при помощи демагнетайзера LDA-3 (AGICO, Чехия). Обработка измерений остаточной намагниченности выполнялась при помощи пакета программ Р.Дж. Энкина [15] и PMTools [16], использующих при выделении компонент намагниченности метод PCA [17]. Измерения анизотропии магнитной восприимчивости (AMB) производились на каппабридже KLY-4S (AGICO, Чехия) в поле 200 А/м. При интерпретации результатов использовалась программа Anisoft 4.2 (Чехия). Зависимость магнитной восприимчивости от температуры измерялась на каппабридже KLY-4S с использованием высокотемпературной приставки CS-4, обработка результатов выполнялась в программе Cureval 8.

3. Результаты и их обсуждение

Петромагнетизм. Результаты лабораторных исследований анизотропии магнитной восприимчивости (AMB) были проанализированы послойно для каждого разреза (рис. 2). Корректированная степень AMB (P_j) образцов разреза Вязовка принимает значения от 2 до 10%. Минимальные оси эллипсоидов AMB (K3) расположены вертикально, а промежуточные (K2) и максимальные (K1) оси лежат в плоскости напластования. В разрезе Самбулак форма эллипсоида AMB уплощенная, степень анизотропии $P_j = 2-8\%$, оси K3 расположены кучно и практически субвертикально, оси K2 и K1 лежат в плоскости напластования. AMB разреза Воздвиженка близка к результатам, полученным для вышеописанного разреза Самбулак. Степень анизотропии составляет здесь 2–7%, форма эллипсоида уплощенная. Оси K3 хорошо сгруппированы и направлены субвертикально, оси K1 и K2 формируют четкие кластеры и находятся в плоскости напластования. В разрезе Красногор степень AMB не превышает 7%, форма эллипсоидов AMB как уплощенная, так и вытянутая. Оси K2 и K3 равномерно распределены в одной плоскости, перпендикулярной плоскости напластования, а оси K1 кучно сгруппированы, находятся в плоскости напластования и ориентированы строго С–Ю. Указанный характер магнитной текстуры может, наиболее вероятно, рассматриваться как результат динамики водных потоков, а также свидетельствовать о направлении течений палеорек при формировании пород изученных разрезов.

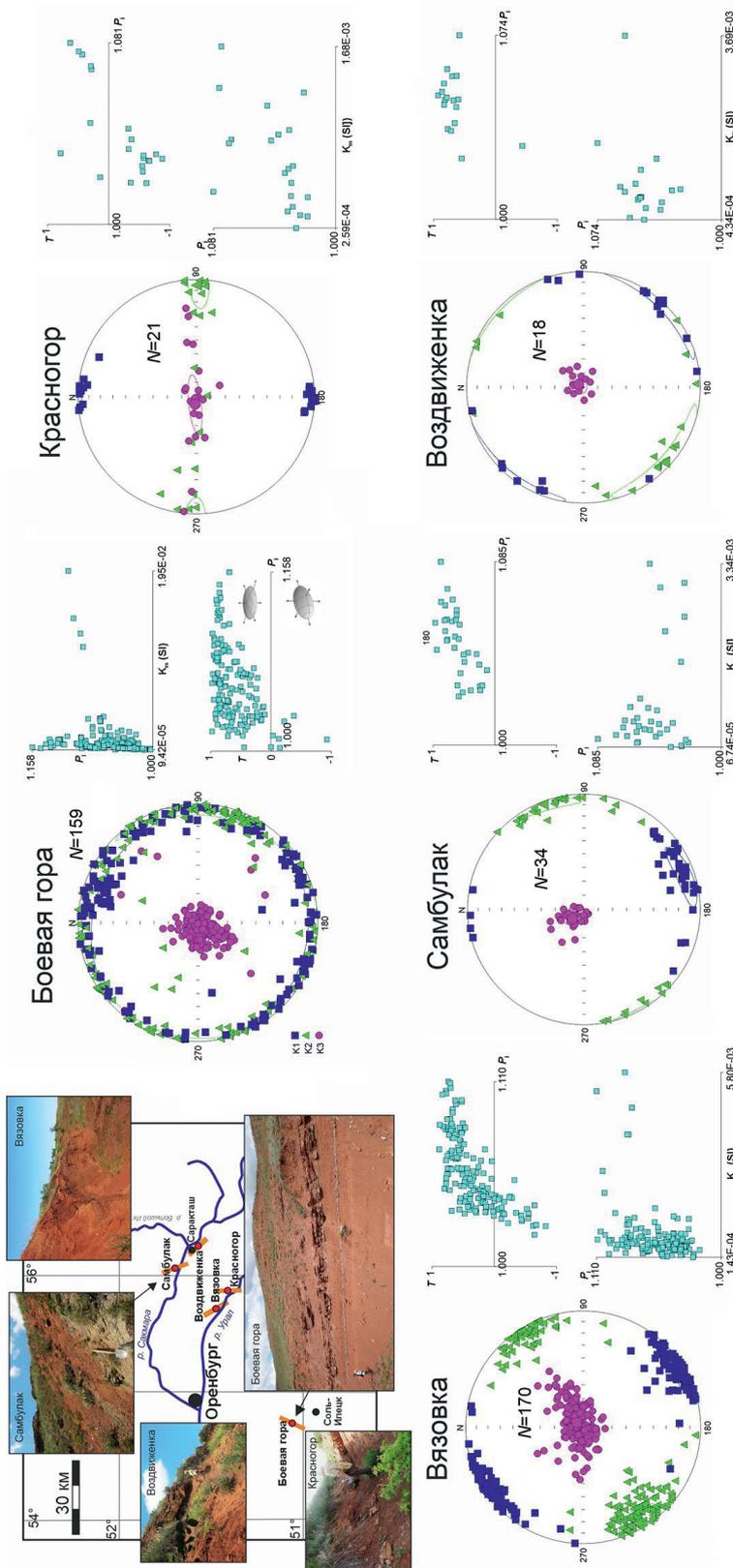


Рис. 2. Расположение изученных разрезов и анизотропия магнитной восприимчивости (АМВ) слагающих их пород. Сверху вниз: стереограмма распределения длинной, промежуточной и короткой полуосей овала АМВ (K_1 , K_2 и K_3 соответственно) в проекции на нижнюю полуосферу в стратиграфической системе координат (оранжевые отрезки на схеме изученных разрезов – направления максимальной (K_1) оси эллипсоида АМВ в данном разрезе); диаграмма Желинека, иллюстрирующая зависимость параметра формы эллипсоида АМВ (T_1) от скорректированной степени анизотропии (P_j); зависимость P_j от величины магнитной восприимчивости (K_m)

Минералы – носители намагниченности в исследуемых породах диагностировались при помощи кривых зависимости магнитной восприимчивости от температуры (рис. 3). Кривые нагрева и охлаждения для большинства образцов необратимы, что свидетельствует о минеральных превращениях при нагреве в воздушной среде. Наблюдаемое в ряде образцов увеличение магнитной восприимчивости в интервале температур 20–350 °С может быть связано с деблокированием мелких зерен магнетита и/или с дегидратацией гидроокислов железа, а общее уменьшение магнитной восприимчивости после нагрева – с окислением маггемита до гематита. Магнетит и гематит обнаруживаются во всех образцах по характерным перегибам термокривых в интервалах температур 560–580 °С и 680–700 °С соответственно.

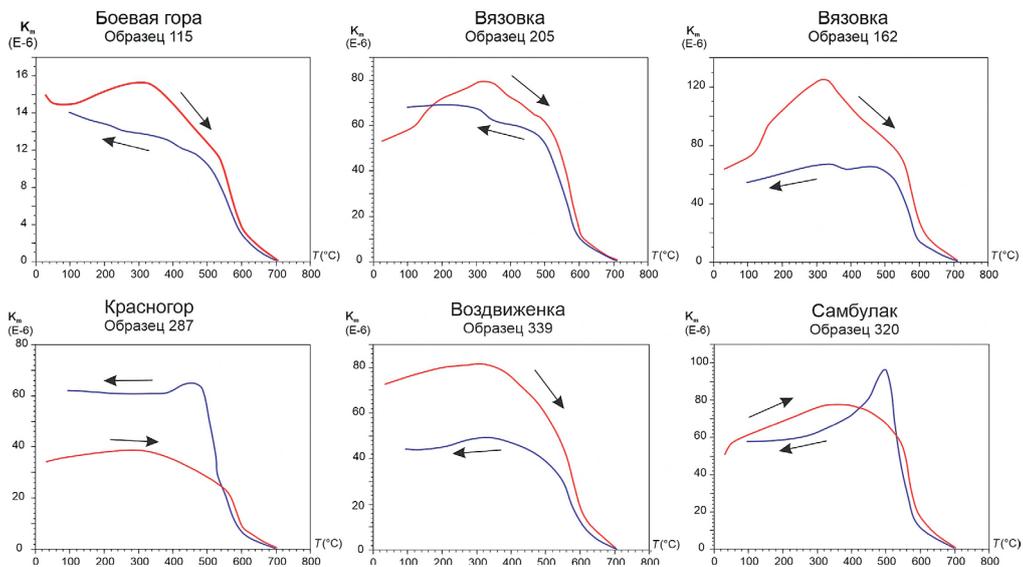


Рис. 3. Зависимость магнитной восприимчивости от температуры в образцах из изученных разрезов; красная – кривая нагрева, синяя – кривая охлаждения. Нагревы проводились в воздушной среде

Палеомагнетизм. Палеомагнитный сигнал в изученных породах удовлетворительного качества, проведение компонентного анализа возможно в среднем в 60% случаев. В составе естественной остаточной намагниченности (ЕОН) пород выделяется не более двух компонент ЕОН (рис. 4). Низкотемпературная компонента присутствует в большинстве образцов и разрушается в интервале температур 100–250 °С, ее среднее направление близко к направлению современного поля в районе исследований, что позволяет предполагать современный возраст и вязкую природу этой компоненты.

В разрезе Боевая гора, в образцах из самого нижнего опробованного слоя (слой № 12, верхняя пермь), выделяется высокотемпературная характеристическая (ChRM) компонента (300–690 °С) обратной полярности (**R**), а в образцах из остальной части разреза ChRM (верхняя пермь и нижний триас) имеет прямую полярность (**N**). Направления компонент прямой и обратной полярности близки к антиподальности, однако тест обращения [18] отрицательный ($\gamma/\gamma_{cr} = 11.4/9.0$), что, вероятно, связано с неполным разделением вязкой и характеристической компонент намагниченности и большим разбросом единичных палеомагнитных

направлений (рис. 5). Объем выборки единичных палеомагнитных направлений ($N > 80$) позволяет выполнить оценку коэффициента занижения наклонения в исследованных породах методом E/I [19], однако его использование не дало результатов.

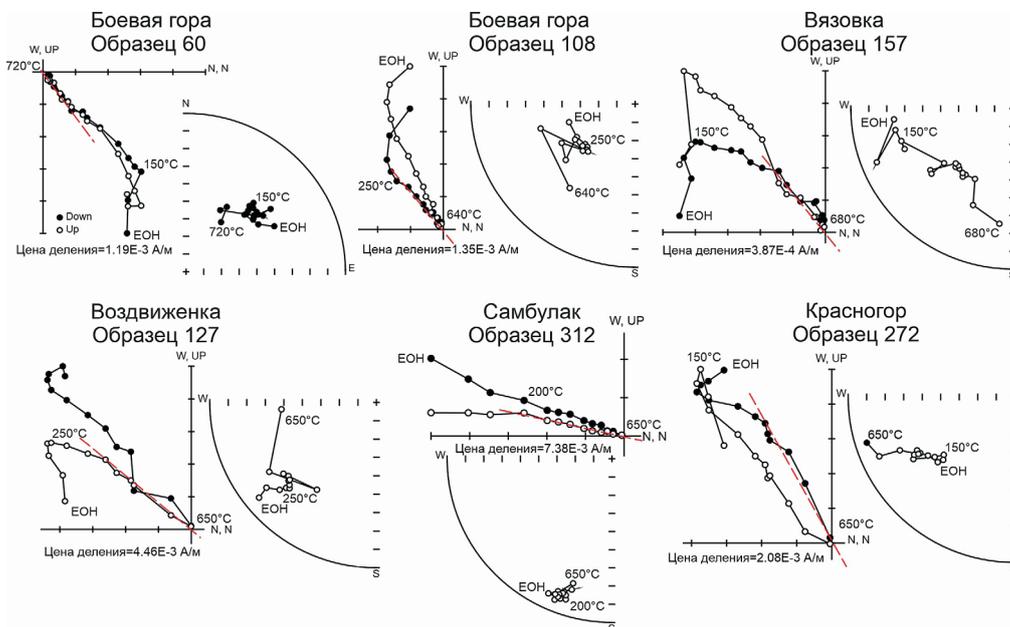


Рис. 4. Результаты температурной магнитной чистки типичных образцов пород изученных разрезов: стереограммы и диаграммы Зийдервельда (стратиграфическая система координат). Залитые и пустые кружки на стереограммах – проекции вектора соответственно на нижнюю и верхнюю полусферы; залитые и пустые кружки на диаграммах Зийдервельда – проекции вектора на горизонтальную и вертикальную плоскости

В разрезе Вязовка направления ChRM обратной полярности (400–660 °C) и близки к ожидаемым пермо-триасовым. Для интервала в нижней части опробованной толщи разреза высокотемпературная компонента имеет аномальные направления, близкие к обнаруженным ранее в некоторых пограничных Р–Т-разрезах Русской плиты [3, 5, 6]; эти направления были исключены из выборки, используемой для вычисления среднего палеомагнитного направления. Методом E/I была выполнена оценка коэффициента занижения наклонения $f = 0.79$. В дальнейших вычислениях использовали среднее палеомагнитное направление по разрезу Вязовка в стратиграфической системе координат, скорректированное за эффект занижения наклонения (табл. 1, № 5). В образцах из разрезов Воздвиженка и Красногор ChRM (340–700 °C) исключительно обратной полярности, что свидетельствует о верхнепермском возрасте опробованных интервалов этих разрезов. Палеомагнитная запись в большинстве образцов из разреза Самбулак характеризуется плохим качеством, что определяет большой разброс направлений ChRM, имеющей обратную полярность.

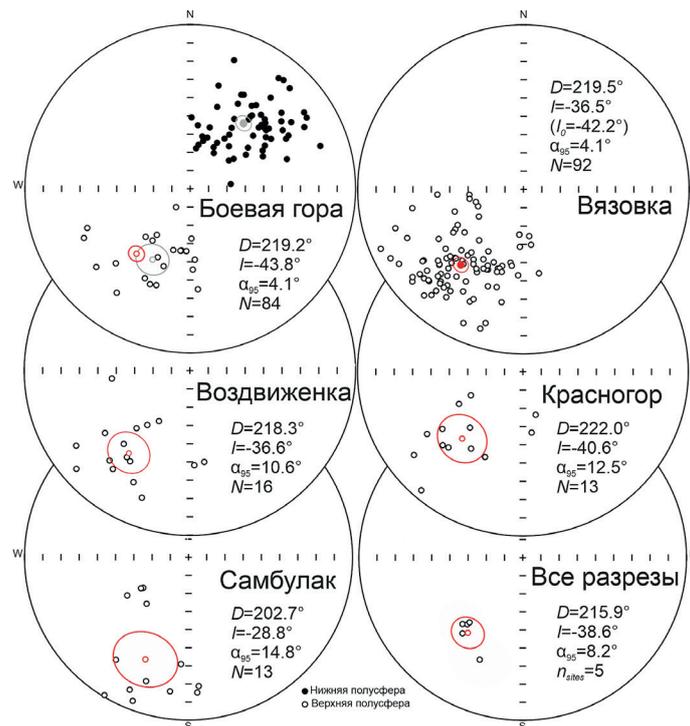


Рис. 5. Направления характеристических компонент намагниченности для исследованных разрезов на уровне образцов и их средние (красным цветом) с кругами 95%-ного доверия (стратиграфическая система координат). Справа внизу – среднее палеомагнитное направление для пяти изученных разрезов.

Для каждого изученного разреза были рассчитаны среднее палеомагнитное направление и соответствующий ему полюс (табл. 1, рис. 5 и 6). Для разрезов Боевая гора и Вязовка, в которых из значительных стратиграфических интервалов отображено более 100 штучков, вычисленные полюсы с высокой степенью вероятности могут рассматриваться как палеомагнитные. Для разрезов Воздвиженка, Красногор и Самбулак относительно малое количество образцов и/или узкий стратиграфический интервал опробования определяют вычисленный полюс скорее как виртуальный геомагнитный. Важно отметить, что при вычислении среднего для всех разрезов палеомагнитного направления в стратиграфической системе координат значение кучности существенно выше, чем в географической системе координат (табл. 1). Этот факт мы рассматриваем как положительный региональный тест складки, который свидетельствует об образовании ChRM до дислокации изученных толщ.

На первичность характеристической компоненты ЕОН в породах изученных разрезов указывает региональный тест складки, наличие в разрезе Боевая гора характеристической компоненты прямой и обратной полярности, близость рассчитанных средних палеомагнитных направлений для каждого разреза, за исключением разреза Самбулак, к ожидаемому направлению геомагнитного поля около 252 млн лет назад (граница перми-триаса) для данного района.

В табл. 1 представлены (№ 13 и № 14) палеомагнитные (виртуальные геомагнитные) полюсы Восточно-Европейской платформы, вычисленные на основе полученных в этой работе палеомагнитных данных; рис. 6 визуализирует данные в табл. 1.

Табл. 1.

Средние палеомагнитные направления и полюсы для изученных разрезов

№	Разрез	slat (°N)	slong (°E)	n/N	Палеомагнитное направление (система координат: географиче- ская/стратиграфическая)			Палеомагнитный (виртуальный геомагнитный) полюс				
					D (°)	I (°)	K	α_{95} (°)	Plat (°)	Plong (°)	dp/dm [A ₉₅] (°)	Paleolat (°)
1	Боевая гора (N)	51.3	54.9	62	50.5/42.9	39.8/42.6	16.6/16.6	4.6/4.6	47.9	167.6	3.5/5.7	24.7
2	Боевая гора (R)	51.3	54.9	22	219.4/207.9	-46.0/46.5	14.9/14.9	8.3/8.3	58.5	182.5	6.9/10.7	27.8
3	Боевая гора (P ₃ -T ₁)	51.3	54.9	149/84	227.8/219.2	-41.5/-43.8	15.6/15.4	4.0/4.1	50.7	170.7	3.2/5.1	25.6
4	Вязовка (P ₃ -T ₁)	51.7	55.8	170/92	225.7/219.5	-32.9/-36.5	14.4/14.1	4.0/4.1	46.1	176.4	2.8/4.8	20.3
5	Вязовка (P ₃ -T ₁), f=0.79	51.7	55.8	170/92	-219.5	-/-42.2	-/14.1	-/4.1	49.4	172.8	3.1/5.0	24.4
6	Самбулак (P ₃)	51.9	56.2	35/13	206.5/202.7	-21.2/-28.8	8.8/8.8	14.8/14.8	49.2	201.5	9.0/16.3	15.4
7	Воздвиженка (P ₃)	51.7	56.4	19/16	222.4/218.3	-25.5/-36.6	13.1/13.1	10.6/10.6	46.8	178.3	7.2/12.4	20.4
8	Красногор (T ₁)	51.6	56.1	20/13	235.9/222.0	-21.7/-40.6	12.0/12.0	12.5/12.5	47.1	171.4	9.2/15.1	23.2
9	Астрахановка (T ₁)*	52.2	55.7	57					46.6	160.2	3.1/4.8	27.9
10	Боевая гора (P ₃ -T ₁)**	51.3	54.9	60					55.4	185.9	4.7/7.6	24.2
11	Туембетка (P ₃ -T ₁)**	51.9	56.3	87					51.9	189.4	3.3/5.5	21.1
12	Самбулак (P ₃ -T ₁)**	51.9	56.2	27					58.5	196.0	9.2/14.8	25.1
13	Среднее для (3, 5-8)	51.7	55.8	(5)	223.5/215.9	-28.9/-38.6	39.1/87.0	12.4/8.2	49.2	178.8	8.2	
14	Среднее для (3, 5, 7, 8)	51.7	55.8	(4)	228.1/219.7	-30.5/-40.8	64.2/596.6	11.6/3.8	48.5	173.4	3.4	

Примечания: slat, slong – широта и долгота точки отбора; n – общее количество образцов, прошедших магнитную чистку, N – количество образцов, участвующих при вычислении среднего направления; D, I, K, α_{95} – характеристики распределения Фишера: склонение, наклонение, кучность и радиус круга 95%-ного доверия соответственно; Plat, Plong, dp/dm, Paleolat – широта и долгота палеомагнитного (виртуального геомагнитного) полюса, палеоширота места отбора образцов и величины полуосей овала 95%-ного доверия соответственно. Литература: * [3], ** [7].

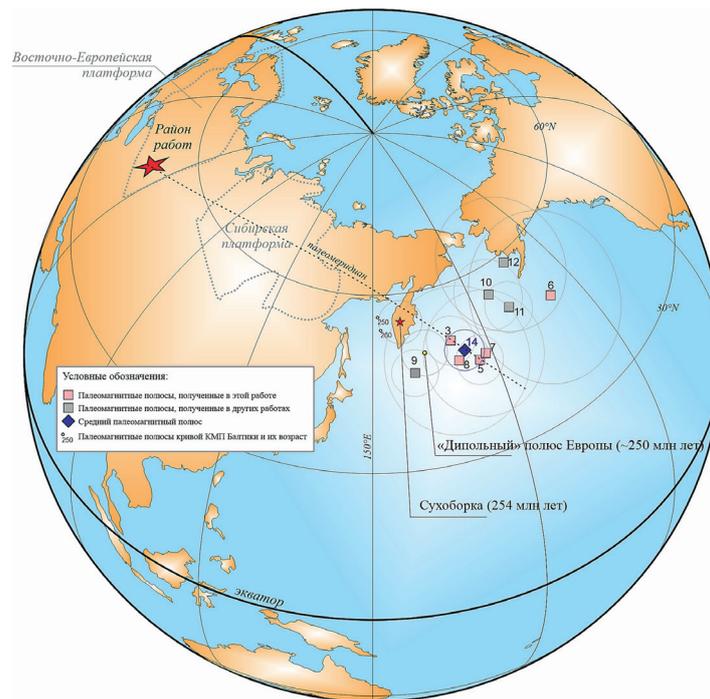


Рис. 6. Сравнение палеомагнитных полюсов для разрезов юго-восточной части Восточно-Европейской платформы (табл. 1). Палеомагнитные полюсы кривой КМП Балтики приведены по работе [1], полюс Сухоборка – [6], «дипольный» полюс – [20]

Палеомагнитная запись образцов из разреза Самбулак характеризуется низким качеством сигнала, что определяет большой разброс единичных палеомагнитных направлений. Кроме того, полюс Самбулак (№ 6) расположен существенно в стороне от полюсов, полученных по другим разрезам. Аналогичный результат по разрезу Самбулак был получен ранее в работе [7]: этот полюс (№ 12) также находится в стороне от основной группы палеомагнитных полюсов и характеризуется большим овалом 95%-ного доверия. Принимая во внимание перечисленные наблюдения, оба полюса по разрезу Самбулак не могут считаться надежными и не использовались нами при дальнейших построениях.

Полюсы, вычисленные для разрезов Боевая гора, Вязовка, Воздвиженка и Красногор, кучно группируются вокруг их среднего (полюс № 14). Малая выборка единичных палеомагнитных направлений для разрезов Воздвиженка и Красногор, а также большие круги 95%-го доверия средних палеомагнитных направлений по этим разрезам не позволяют рассматривать соответствующие полюсы (№ 7 и № 8) как палеомагнитные; они были использованы при вычислении среднего палеомагнитного полюса (№ 14) в качестве виртуальных геомагнитных полюсов.

Любопытно отметить, что палеомагнитные полюсы, полученные в работе [7] по пограничным пермо-триасовым разрезам Оренбургской области Боевая гора (№ 10), Туембетка (№ 11) и Самбулак (№ 12), а также палеомагнитный полюс по разрезу Астрахановка (№ 9) из работы [3] лежат на существенном удалении от группы палеомагнитных полюсов, полученных в этой работе. На данном этапе

исследований можно лишь предполагать возможные причины такого разброса полюсов, к которым относятся, например, особенности палеомагнитной записи в преимущественно грубообломочных породах нижнего триаса, в частности ее низкое качество, а также наличие неучтенных блоковых тектонических движений. Тем не менее палеомагнитные полюсы № 3 (Боевая гора) и № 5 (Вязовка), основанные на представительной выборке единичных палеомагнитных определений, полученных по интервалам разрезов значительной мощности (более 10 м), могут рассматриваться как достаточно надежные полюсы Восточно-Европейской платформы для пограничного пермо-триасового времени и использоваться для палеотектонических построений.

Заключение

По результатам палеомагнитных исследований пяти разрезов терригенных пород пограничного пермо-триасового возраста Волго-Уральской антеклизы Восточно-Европейской платформы (Оренбургская область) получены их петромагнитные характеристики и палеомагнитные определения. Главные выводы по проведенному исследованию:

1) характер анизотропии магнитной восприимчивости свидетельствует об активной гидродинамической обстановке при накоплении изученных пород и может использоваться для реконструкции палеотечений в бассейне осадконакопления;

2) полюсы по разрезам Боевая гора и Вязовка можно рассматривать как надежные P–T-полюсы Восточно-Европейской платформы, последний из которых вычислен с учетом коэффициента занижения наклона $f = 0.79$, определенного непосредственно для разреза Вязовка методом E/I ;

3) проведенное сравнение палеомагнитных полюсов, полученных в этой работе и ранее, демонстрирует существенный их разброс относительно среднего, что может как иметь тектонические причины, так и являться следствием плохого качества палеомагнитного сигнала в породах ряда обнажений.

Благодарности. Исследования проведены при поддержке гранта РФФИ № 22-27-00597, <https://rscf.ru/project/22-27-00597/>.

Литература

1. *Torsvik T.H., Van der Voo R., Preeden U., Mac Niocaill C., Steinberger B., Doubrovine P.V., van Hinsbergen D.J.J., Domeier M., Gaina C., Tohver E., Meert J.G., McCausland P.J.A., Cocks L.R.M.* Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics // *Earth-Sci. Rev.* 2012. V. 114, No 3–4. P. 325–368. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007>.
2. *Диденко А.Н.* Анализ мезозойско-кайнозойских палеомагнитных полюсов и траектория кажущейся миграции полюса Сибири // *Физика Земли.* 2015. № 5. С. 65–79. <https://doi.org/10.7868/S000233371505004X>.
3. *Фетисова А.М., Веселовский Р.В., Шольце Ф., Балабанов Ю.П.* Новый пермо-триасовый палеомагнитный полюс Восточно-Европейской платформы, вычисленный с учетом занижения наклона в осадочных породах // *Физика Земли.* 2018. № 1. С. 158–171. <https://doi.org/10.7868/S0002333718010131>.
4. *Фетисова А.М., Веселовский Р.В., Арефьев М.П.* Новые палеомагнитные данные по пермо-триасовым осадочным разрезам Московской синеклизы // *Ученые записки*

- Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2020. Т. 162, кн. 2. С. 228–243. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.2.228-243>.
5. Фетисова А.М., Голубев В.К., Веселовский Р.В., Балабанов Ю.П. Палеомагнетизм и магнитостратиграфия опорных пермо-триасовых разрезов центральной части Русской плиты: Жуков овраг, Слукино и Окский съезд // Геология и геофизика. 2022. Т. 63, № 10. С. 1401–1419. <https://doi.org/10.15372/GiG2021157>.
 6. Фетисова А.М., Веселовский Р.В., Голубев В.К. Новый 254 млн лет палеомагнитный полюс Восточно-Европейской платформы: Московская синеклиза, разрезы Сухоборка и Сосновка // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 510, № 2. С. 220–226. <https://doi.org/10.31857/S2686739723600194>.
 7. Taylor G.K., Tucker C., Twitchett R.J., Kearsley T., Benton M.J., Newell A.J., Surkov M.V., Tverdokhlebov V.P. Magnetostratigraphy of Permian/Triassic boundary sequences in the Cis-Urals, Russia: No evidence for a major temporal hiatus // Earth Planet. Sci. Lett. 2009. V. 281, No 1–2. P. 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.02.002>.
 8. Tverdokhlebov V.P., Tverdokhlebova G.I., Surkov M.V., Benton M.J. Tetrapod localities from the Triassic of the SE of European Russia // Earth-Sci. Rev. 2003. V. 60, No 1–2. P. 1–66. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00076-4).
 9. Tverdokhlebov V.P., Tverdokhlebova G.I., Minikh A.V., Surkov M.V., Benton M.J. Upper Permian vertebrates and their sedimentological context in the South Urals, Russia // Earth-Sci. Rev. 2005. V. 69, No 1–2. P. 27–77. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.07.003>.
 10. Сенников А.Г., Новиков И.В., Голубев В.К., Наумчева М.А., Ульяхин А.В., Зенина Ю.В., Гунчин Р.А. К фаунистической характеристике опорного разреза пограничных отложений перми и триаса Боевая гора в Южном Приуралье // Палеонтология и стратиграфия: современное состояние и пути развития: материалы 68-й сессии Палеонтологического общества при РАН, посвященной 100-летию со дня рождения Александра Ивановича Жамойды / под ред. А.Ю. Розанова, О.В. Петрова. СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 2022. С. 237–240.
 11. Твердохлебов В.П. Бассейн р. Урал // Граница перми и триаса в континентальных сериях Восточной Европы / под ред. В.Р. Лозовского, Н.К. Есауловой. М.: ГЕОС, 1998. С. 37–42.
 12. Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С., Родионов В.П., Слауцитайс И.П. Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с.
 13. Tauxe L., Vanerjee S.K., Butler R.F., Van der Voo R. Essentials of Paleomagnetism, 4th Web ed., 2016. <https://earthref.org/MagIC/books/Tauxe/Essentials/>
 14. Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарев А.В., Фокин И.В., Патонин А.В., Пасенко А.М., Фетисова А.М., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А., Рудько Д.В., Чистякова А.В. Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № 2. Ст. 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>.
 15. Enkin R.J. A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Sidney, B.C.: Pac. Geosci. Cent., Geol. Surv. Can., 1994. 16 p.
 16. Ефремов И.В., Веселовский Р.В. PMTools: новое программное обеспечение для анализа палеомагнитных данных // Физика Земли. 2023. № 5. С. 150–158. <https://doi.org/10.31857/S0002333723050022>.
 17. Kirschvink J.L. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data // Geophys. J. Int. 1980. V. 62, No 3. P. 699–718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x>.

18. *McFadden P.L., McElhinny M.W.* Classification of the reversal test in palaeomagnetism // *Geophys. J. Int.* 1990. V. 103, No 3. P. 725–729. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x>.
19. *Tauxe L., Kent D.V.* A simplified statistical model for the geomagnetic field and the detection of shallow bias in paleomagnetic inclinations: Was the ancient magnetic field dipolar? // *Timescales of the Paleomagnetic Field* / Ed. by J.E.T. Channell, D.V. Kent, W. Lowrie, J.G. Meert. Ser.: *Geophysical Monograph Series*. Washington, D.C.: Am. Geophys. Union, 2004. V. 145. P. 101–116. <https://doi.org/10.1029/145GM08>.
20. *Bazhenov M.L., Shatsillo A.V.* Late Permian palaeomagnetism of Northern Eurasia: Data evaluation and a single-plate test of the geocentric axial dipole model // *Geophys. J. Int.* 2010. V. 180, No 1. P. 136–146. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04379.x>.

Поступила в редакцию 31.08.2023

Принята к публикации 01.10.2023

Фетисова Анна Михайловна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры динамической геологии геологического факультета; инженер лаборатории главного геомагнитного поля и петромагнетизма

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119234, Россия

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

ул. Большая Грузинская, д.10, стр.1, г. Москва, 123242, Россия

E-mail: anna-fetis@yandex.ru

Веселовский Роман Витальевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, профессор, и.о. заведующего кафедрой динамической геологии геологического факультета; главный научный сотрудник лаборатории археомагнетизма и эволюции главного геомагнитного поля

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119234, Россия

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

ул. Большая Грузинская, д.10, стр.1, Москва, 123242, Россия

E-mail: roman.veselovskiy@ya.ru

Голубев Валерий Константинович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН

ул. Профсоюзная, д. 123, г. Москва, 117647, Россия

E-mail: vg@paleo.ru

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.590-605

**Paleomagnetism of the Permian-Triassic Boundary of the Orenburg Region
(East European Platform, Volga-Ural Antecline)***A.M. Fetisova^{a,b*}, R.V. Veselovskiy^{a,b**}, V.K. Golubev^{c***}*^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia*^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
Moscow, 123242 Russia*^c*Borissiak Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117647 Russia*E-mail: ^{*}*anna-fetis@yandex.ru*, ^{**}*roman.veselovskiy@ya.ru*, ^{***}*vg@paleo.ru*

Received August 31, 2023; Accepted October 1, 2023

Abstract

This article presents the results of a detailed paleomagnetic study of five sections of the Permian-Triassic sedimentary rocks from the southeastern part of the Volga-Ural antecline in the East European Platform (Orenburg region, Russia): Boevaya Gora, Vyazovka, Sambulak, Krasnogor, and Vozdvizhenka. The magnetic fabric determined by magnetic susceptibility anisotropy indicates that the rocks accumulated under the conditions of intense hydrodynamic activity. This makes it possible to reconstruct a predominantly submeridional transport of detrital material. The rocks of the Boevaya Gora section have a bipolar distribution of the characteristic component of their remanent magnetization, while other sections show a reversed polarity. In the Vyazovka section, the *E/I* method was used to calculate the inclination shallowing coefficient of the rocks ($f = 0.79$). The regional fold test yielded positive results, suggesting that the rocks of the studied sections were displaced after the deposition. For each section, paleomagnetic poles were calculated, with the poles of the Boevaya Gora and Vyazovka sections being the most reliable. The mean paleomagnetic pole coordinates of the studied sections, except the Sambulak section, are as follows: $\text{slat} = 51.7^\circ$, $\text{slong} = 55.8^\circ$, $n = 4$, $\text{plat} = 48.5^\circ$, $\text{plong} = 173.4^\circ$, $\alpha_{95} = 3.4^\circ$, $\text{paleolat} = 23.4^\circ$.

Keywords: paleomagnetism, East European Platform, Permian, Triassic, paleomagnetic pole, Orenburg region

Acknowledgements. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-27-00597, <https://rscf.ru/project/22-27-00597/>).

Figure Captions

Fig. 1. Geological scheme of the study area based on the State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:1000000 (third generation), Urals Ser., Sheet M-40 (Orenburg), and the location of the studied sections.

Fig. 2. Position of the studied sections and magnetic susceptibility anisotropy of (MSA) of their rocks. From top to bottom: stereogram showing the distribution of maximum, intermediate, and minimum semi-axes of the MSA ellipsoid (K1, K2, and K3, respectively) in the projection on the lower hemisphere (orange lines on the scheme of the studied sections mean the strike of the maximum (K1) axis of the MSA ellipsoid in the section); Jelinek diagram illustrating the dependence of the MSA ellipsoid shape (T) on the corrected anisotropy degree (P_j); dependence of the P_j value on magnetic susceptibility (K_m).

Fig. 3. Temperature dependence of magnetic susceptibility in the rock samples from the studied sections;

- red – heating curve, blue – cooling curve. Heating was carried out in air.
- Fig. 4. Results of the thermal demagnetization of the typical samples from the studied sections: stereograms, Zijderveld diagrams (stratigraphic coordinates). Solid and empty circles on the stereograms indicate the projection of the vector on the upper and lower hemispheres, respectively; solid and empty circles on the Zijderveld diagrams show the projections of the vector on the horizontal and vertical planes, respectively.
- Fig. 5. Directions of the characteristic magnetization components for each sample and their mean values (red) with the confidence level of 95% (stratigraphic coordinates). The mean paleomagnetic directions for all the five studied sections are displayed at the bottom right corners.
- Fig. 6. Comparison of the paleomagnetic poles for the studied sections in the southeastern part of the East European Platform (Table 1). Paleomagnetic poles on Baltica's APWP curve by [1], Sukhoborka pole by [6], "dipole" pole by [20].

References

1. Torsvik T.H., Van der Voo R., Preeden U., Mac Niocaill C., Steinberger B., Doubrovine P.V., van Hinsbergen D.J.J., Domeier M., Gaina C., Tohver E., Meert J.G., McCausland P.J.A., Cocks L.R.M. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics. *Earth-Sci. Rev.*, 2012, vol. 114, nos. 3–4, pp. 325–368. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.06.007>.
2. Didenko A.N. The analysis of Meso-Cenozoic paleomagnetic poles and the apparent polar wander path of Siberia. *Izv., Phys. Solid Earth*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 674–688. <https://doi.org/10.1134/S1069351315050043>.
3. Fetisova A.M., Veselovskiy R.V., Scholze F., Balabanov Yu.P. The new Permian–Triassic paleomagnetic pole for the East European Platform corrected for inclination shallowing. *Izv., Phys. Solid Earth*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 150–162. <https://doi.org/10.1134/S1069351318010068>.
4. Fetisova A.M., Veselovskiy R.V., Arefiev M.P. New paleomagnetic data on the Permian–Triassic sedimentary sections of the Moscow syncline. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya: Estestvennye Nauki*, 2020, vol. 162, no. 2, pp. 228–243. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.2.228-243>. (In Russian)
5. Fetisova A.M., Golubev V.K., Veselovskiy R.V., Balabanov Yu.P. Paleomagnetism and magnetostratigraphy of Permian–Triassic reference sections in the central Russian plate: Zhukov ravine, Slukino, and Okskiy Siyezd. *Russ. Geol. Geophys.*, 2022, vol. 63, no. 10, pp. 1162–1176. <https://doi.org/10.2113/RGG20214336>.
6. Fetisova A.M., Veselovskiy R.V., Golubev V.K. A new 254 Ma paleomagnetic pole of the East European Platform: The Moscow syncline, the Sukhoborka and Sosnovka sections. *Dokl. Earth Sci.*, 2023, vol. 510, pt. 2, pp. 475–480. <https://doi.org/10.1134/S1028334X2360038X>.
7. Taylor G.K., Tucker C., Twitchett R.J., Kearsley T., Benton M.J., Newell A.J., Surkov M.V., Tverdokhlebov V.P. Magnetostratigraphy of Permian/Triassic boundary sequences in the Cis-Urals, Russia: No evidence for a major temporal hiatus. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2009, vol. 281, nos. 1–2, pp. 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.02.002>.
8. Tverdokhlebov V.P., Tverdokhlebova G.I., Surkov M.V., Benton M.J. Tetrapod localities from the Triassic of the SE of European Russia. *Earth-Sci. Rev.*, 2003, vol. 60, no. 1–2, pp. 1–66. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00076-4](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00076-4).
9. Tverdokhlebov V.P., Tverdokhlebova G.I., Minikh A.V., Surkov M.V., Benton M.J. Upper Permian vertebrates and their sedimentological context in the South Urals, Russia. *Earth-Sci. Rev.*, 2005, vol. 69, nos. 1–2, pp. 27–77. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.07.003>.
10. Sennikov A.G., Novikov I.V., Golubev V.K., Naumcheva M.A., Ul'yakhin A.V., Zenina Yu.V., Gunchin R.A. On the faunal characteristics of the Permian–Triassic boundary reference section of Boyevaya Gora, Southern Cis-Urals, Russia. In: Rozanov A.Yu., Petrov O.V. (Eds.) *Paleontologiya i stratigrafiya: sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya: materialy 68-i sessii Paleontologicheskogo obshchestva pri RAN, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya Aleksandra Ivanovicha Zhamoidy* [Paleontology and Stratigraphy: Current State and Ways Forward: Proc. 68th Session of the Paleontological Society Dedicated to the 100th Anniversary of the Birth of Aleksandr Ivanovich Zhamoida]. St. Petersburg, Izd. VSEGEI, 2022, pp. 237–240. (In Russian)

11. Tverdokhlebov V.P. The Ural River basin. In: Lozovskii V.R., Esaulova N.K. (Eds.) *Granitsa permi i triasa v kontinental'nykh seriyakh Vostochnoi Evropy* [Permian-Triassic Boundary in the Continental Series of Eastern Europe]. Moscow, GEOS, 1998, pp. 37–42. (In Russian)
12. Khranov A.N., Goncharov G.I., Komissarova R.A., Pisarevskii S.A., Pogarskaya I.A., Rzhavskii Yu.S., Rodionov V.P., Slaucaitajs I.P. *Paleomagnetologiya* [Paleomagnetology]. Leningrad, Nedra, 1982. 312 p. (In Russian)
13. Tauxe L, Banerjee S.K., Butler R.F., Van der Voo R. *Essentials of Paleomagnetism*. 4th Web ed., 2016. <https://earthref.org/MagIC/books/Tauxe/Essentials/>.
14. Veselovskiy R.V., Dubinya N.V., Ponomarev A.V., Fokin I.V., Patonin A.V., Pasenko A.M., Fetisova A.M., Matveev M.A., Afinogenova N.A., Rud'ko D.V., Chistyakova A.V. Shared Research Facilities “Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism” of the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. *Geodin. Tektonofiz.*, 2022, vol. 13, no. 2, art. 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>. (In Russian)
15. Enkin R.J. A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Sidney, B.C., Pac. Geosci. Cent., Geol. Surv. Can., 1994. 16 p.
16. Efremov I.V., Veselovskiy R.V. PMTools: New application for paleomagnetic data analysis. *Izv. Phys. Earth*, 2023, vol. 59, no. 5, pp. 798–805. <https://doi.org/10.1134/S1069351323050026>.
17. Kirschvink J.L. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys. J. Int.*, 1980, vol. 62, no. 3, pp. 699–718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x>.
18. McFadden P.L., McElhinny M.W. Classification of the reversal test in palaeomagnetism. *Geophys. J. Int.*, 1990, vol. 103, no. 3, pp. 725–729. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb05683.x>.
19. Tauxe L., Kent D.V. A simplified statistical model for the geomagnetic field and the detection of shallow bias in paleomagnetic inclinations: Was the ancient magnetic field dipolar? In: Channell J.E.T., Kent D.V., Lowrie W., Meert J.G. (Eds.) *Timescales of the Paleomagnetic Field*. Ser.: Geophysical Monograph Series. Vol. 145. Washington, D.C., Am. Geophys. Union, 2004, pp. 101–116. <https://doi.org/10.1029/145GM08>.
20. Bazhenov M.L., Shatsillo A.V. Late Permian palaeomagnetism of Northern Eurasia: Data evaluation and a single-plate test of the geocentric axial dipole model. *Geophys. J. Int.*, 2010, vol. 180, no. 1, pp. 136–146. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04379.x>.

Для цитирования: Фетисова А.М., Веселовский Р.В., Голубев В.К. Палеомагнетизм границы перми-триаса Оренбургской области (Восточно-Европейская платформа, Волго-Уральская антеклиз) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 590–605. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.590-605>.

For citation: Fetisova A.M., Veselovskiy R.V., Golubev V.K. Paleomagnetism of the Permian-Triassic Boundary of the Orenburg Region (East European Platform, Volga-Ural Antecline). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 590–605. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.590-605>. (In Russian)

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.384

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.606-619

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДИПОЛЬНЫХ И НЕДИПОЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ГЕОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ

С.В. Старченко, С.В. Яковлева

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Троицк, Москва, 108840, Россия*

Аннотация

Полная энергия потенциального геомагнитного поля (до границы ядро – мантия) разбивается на дипольную и недипольную части, которые сравниваются исходя из их эволюции и частотных свойств. Наши расчеты основаны на общедоступной и достаточно надежной модели геомагнитного поля COV-OBS.x2, охватывающей период 1840–2020 гг. Предлагаемые аппроксимации на более длительные периоды предварительны, поскольку требуют дальнейшей оценки ошибок посредством сравнения с другими историческими наблюдательными, палеомагнитными моделями геомагнитного поля, а также с численными моделями геодинамо. Фактически дипольная энергия (около 5 ЭДж) всего в три раза превышает недипольную, а не на порядок и более, как это было принято считать до сих пор. Дипольная энергия сравнительно медленно и монотонно уменьшается, а недипольная часть изменяется значительно быстрее и квазипериодически. Поэтому характерные времена для диполя порядка тысячи лет, а для недипольной компоненты – порядка сотен лет. Если ограничиться квадруполем и октуполем (такое ограничение естественно для палео- и археомагнитологов), то энергия такой «урезанной» недипольной части монотонно растет и демонстрирует эволюционные и частотные характеристики, существенно отличающиеся от полной (до 14-й сферической гармоники) недипольной части. Мощность или временная производная от энергии более вариативна по сравнению с энергией и по порядку величины составляет около ста МВт как для дипольной, так и для недипольной части. Частотные характеристики получают из анализа отношения мощности к энергии.

Ключевые слова: геомагнитная энергия, диполь, недиполь, эволюция, сравнение.

Введение

Работа посвящена сравнительному эволюционному и, в определенном роде, пространственному анализу как наблюдаемых, так и моделируемых дипольных и недипольных компонент энергии потенциального геомагнитного поля.

У поверхности Земли напряженность магнитного поля дипольной компоненты на порядок и более превышает напряженность известного недипольного поля [1–3]. Поскольку энергия пропорциональна квадрату напряженности, то дипольная энергия на два-три порядка превышает недипольную у поверхности. Вблизи ядра Земли напряженности этих компонент становятся сравнимыми, а в глубине ядра доминирует недипольная компонента [4, 5].

Исследуемую здесь потенциальную часть главного геомагнитного поля начал изучать Р. Mauersberger в 1956 г. [6]. В 1966 г. F.J. Lowes, по сути, положил начало изучению энергии геомагнитного поля в работе [7]. Он же в работе [4], базируясь на исследовании [6], определил радиальную плотность мультипольных компонент энергии (на фиксированной сфере радиуса r) этого поля через стандартные [1] коэффициенты Гаусса, радиус Земли a и мультипольное число n ($n = 1$ – диполь, $n = 2$ – квадруполь, $n = 3$ – октуполь и т. д.) согласно уравнению 1:

$$R_n = (n+1) \left(\frac{a}{r} \right)^{2n+4} \sum_m^n \left[(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2 \right] \quad (1)$$

С тех пор только это выражение использовалось при исследовании фактически удельной энергии (в Дж/м) всеми известными нам авторами. И только сравнительно недавно Bayanjargal в [8] проинтегрировал эту плотность на 80 км от поверхности Земли, чтобы получить суммарную энергию $E \sim 10^{16}$ Дж в этом узком слое. Независимо от этого мы, интегрируя по радиусу от поверхности ядра до бесконечности (интеграл уже сходится на расстоянии менее a от поверхности Земли) [9], получили на два-три порядка большую энергию, которая сосредоточена у ядра Земли и выражается уравнением 2:

$$E_n = \frac{2\pi a^3}{\mu_0} \sum_{n=1}^{14} \left\{ \left(\frac{a}{c} \right)^{2n+1} \frac{n+1}{2n+1} \sum_{m=0}^n \left[(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2 \right] \right\} . \quad (2)$$

Именно эта энергия представляется наиболее адекватной для выявления глобальных временных характеристик наблюдаемого геомагнитного поля и скрытого от наблюдателя геодинамо. Эти характеристики уже были частично выявлены авторами в ряде предыдущих работ [9, 10] на примере моделей Jackson et al. (2000), IGRF, Gillet et al. (2015) [2, 3, 11].

Естественным образом из уже известных величин энергии геомагнитного потенциального поля можно получить очевидное выражение для вклада n -гармоники в мощность:

$$P_n = dE_n / dt, \quad (3)$$

и его удельной вариации или частоты:

$$S_n = (dE_n / dt) / E_n. \quad (4)$$

В качестве естественной частотной меры предлагается отношение временной вариации значений ряда к самому значению, что эквивалентно логарифмической производной или удельной вариации. По сравнению с традиционными анализами, базирующимися на разложении Фурье, преимущество анализа удельных вариаций заключается в возможности оценивать характерные времена, превышающие длину ряда. При этом можно опираться на гипотезу эргодичности [12, 13], которая делает сравнимыми усреднения по времени и по пространству или свидетельствует о том, что статистические свойства практически не зависят от реализации.

Вместе с тем в геодинамо для некоторых магнитных объектов возможна нарушенная эргодичность (broken ergodicity) [14, 15]. Соответствующие моды будут флуктуирующими случайными величинами с нулевым средним, и в большинстве случаев так оно и есть, за исключением некоторых образований самого

крупного масштаба, которые будут иметь большое среднее значение и сравнительно небольшие флуктуации.

В контексте этой работы естественно ожидать, что такой самый крупный масштаб и малые вариации будут у диполя, что подтверждается прямыми измерениями [2, 16], археомагнитными [17, 18] и палеомагнитными [19–21] реконструкциями. Соответственно, недипольные составляющие ожидаются меньшими по величине, но с большими относительными вариациями, которые будут происходить на более коротких характерных временах.

1. Результаты и их обсуждение

1.1. Исходная модель и эволюционный анализ энергий. В данной работе за основу взята одна из наиболее успешных глобальных геомагнитных моделей COV-OBS.x2 из работы [16]. Эта модель охватывает период 1840–2020 гг. и основана на обсерваторских и спутниковых наблюдениях, а также на более старых исследованиях.

Основной вклад в энергию E вносят три первых дипольных коэффициента этой модели, которые определяются с суммарной погрешностью менее 0.1%. Производная же (или мощность P из уравнения 3) определяется соответствующими производными от первых 15-ти коэффициентов Гаусса (диполь, квадруполь и октуполь) с суммарной ошибкой менее 1% от среднеквадратичных величин [9].

На рис. 1 сравниваются различные суммарные энергии: общая суммарная энергия ($E = E_1 + E_2 + \dots + E_{14}$), дипольная энергия (E_1), недипольная энергия ($E - E_1$) и сумма октупольной и квадрупольной энергии ($E_2 + E_3$).

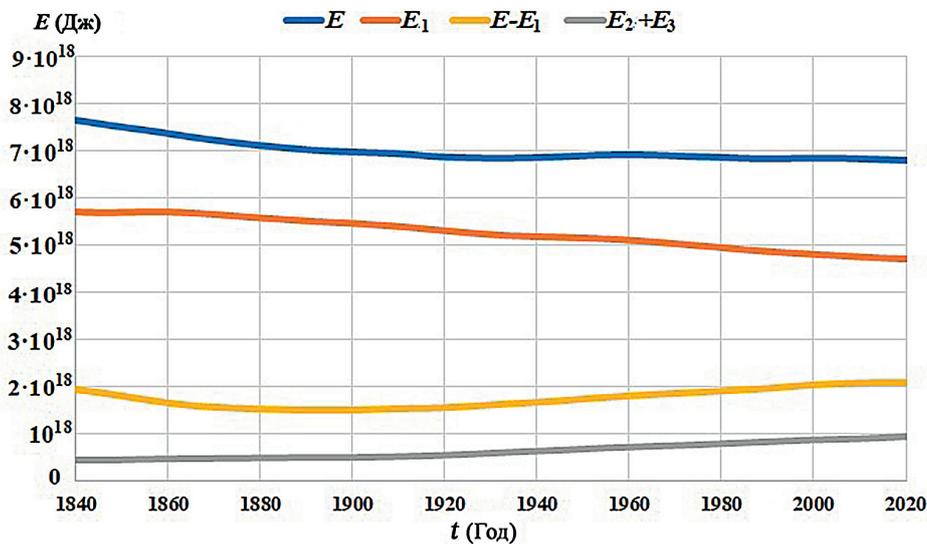


Рис. 1. Эволюционные графики энергии геомагнитного поля: общая суммарная энергия ($E = E_1 + E_2 + \dots + E_{14}$), дипольная энергия (E_1), недипольная энергия ($E - E_1$) и сумма октупольной и квадрупольной энергии ($E_2 + E_3$)

Очевидна крайне малая вариативность представленных на рис. 1 энергий, что обусловлено небольшой длительностью рассматриваемого периода

1840–2020 гг. по сравнению с характерными геомагнитными временами или периодами (см. раздел 3 ниже и множество известных публикаций [1, 5, 13, 17, 20, 21, 24]).

Дипольная энергия E_1 вполне сравнима с полной энергией E . Поэтому палеомагнитные, археомагнитные и исторические исследования могут претендовать на достаточно достоверную оценку величины всей геомагнитной энергии потенциального поля с использованием лишь дипольной составляющей. Напротив, сомнительно использование только квадруполя и октуполя ($E_2 + E_3$) для оценки величины всего недипольного поля $E - E_1$, поскольку $E_2 + E_3$ меньше $E - E_1$ в два-три раза.

Особо следует отметить, что энергия дипольного поля всего лишь в три раза превышает энергию недипольного поля. И это при условии, что энергия пропорциональна квадрату поля и рассматривается только поле в практически изоляторах. Этот факт должен повлиять на массовое сознание, которое до сих пор считает, что геомагнитное поле диполя очень сильно доминирует над остальным недипольным полем.

1.2. Эволюционный анализ мощностей. На рис. 2, *a* и *б* по аналогии с рис. 1 представлены суммарные мощности, которые более вариативны по сравнению с энергиями и имеют порядок величины в сотни МВт. Такое обстоятельство свидетельствует о сильной нелинейности геодинамо. Общеизвестно, что она такая нелинейность воспроизводится в многочисленных геодинамо подобных моделях [5, 25 и ссылки в них].

На рис. 2, *a* сравниваются суммарная мощность P и дипольная мощность P_1 . Легко увидеть, что эти мощности преимущественно негативны, в основном из-за уменьшения модуля диполя в современную эпоху. Преимущественно эволюционное поведение дипольной энергии аналогично поведению полной энергии. Однако примерно с 1840 по 1900 г. наблюдается весьма существенное отступление от такой синхронизации. Возможно, это свидетельствует о различных режимах геодинамо. Вместе с тем не исключено, к сожалению, что рассматриваемая исходная геомагнитная модель не является достаточно достоверной для исследования мощностей в этом интервале времени. Несколько успокаивает лишь то обстоятельство, что изображенные во вставке на рис. 2, *a* статистические характеристики являются сходными между собой как для дипольной, так и для полной энергии.

Более выражено (рис. 2, *б*) отсутствие синхронизации также в 1840–1900 гг. между мощностью всего недипольного поля $P_2 = d(E - E_1)/dt$ и суммарной мощностью двух недипольных компонент $P_3 = d(E_2 + E_3)/dt$. При этом статистические характеристики P_2 существенно отличаются от характеристик P_3 (вставка на рис. 2, *б*). Поэтому мы приходим к неутешительному выводу, что «урезанное» до квадруполя и октуполя недипольное поле вряд ли может достаточно достоверно отображать все недипольное поле.

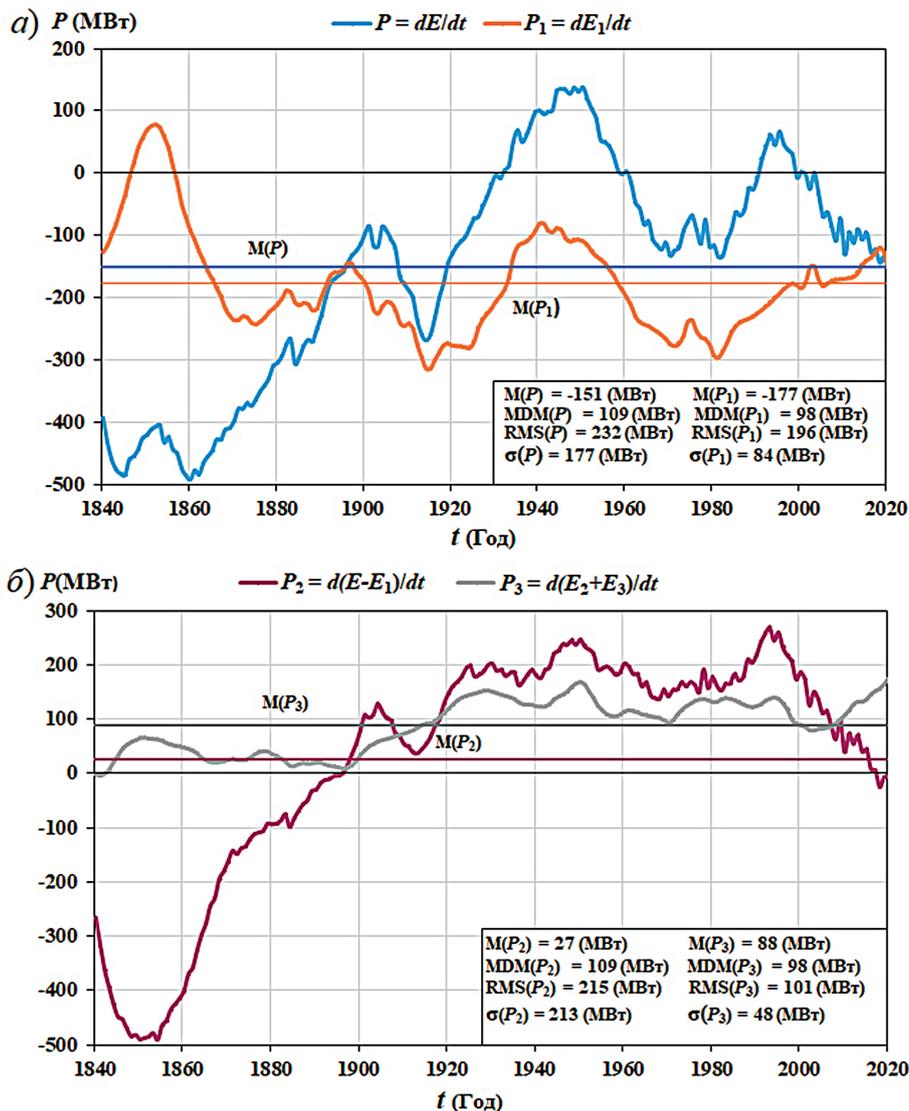


Рис. 2. Сравнительные эволюционные графики различных компонент мощности геомагнитного поля: а) общая суммарная мощность $P = dE/dt$ и дипольная мощность $P_1 = dE_1/dt$; б) мощность всего недипольного поля $P_2 = d(E - E_1)/dt$ и суммарная мощность двух недипольных компонент $P_3 = d(E_2 + E_3)/dt$. Во вставках представлены статистические величины: М – среднеарифметическое значение, MDM – медиана, RMS – среднеквадратичное значение, σ – среднеквадратичное отклонение

1.3. Эволюционный анализ частот. По аналогии с рис. 2. на рис. 3 представлены попарно удельные вариации или частоты, рассчитанные по уравнению 4.

Обратная к изображенным на рис. 3 частотам величина представляет собой характерные времена, выраженные в столетиях. Таким образом, получаем естественную меру для вековых вариаций.

Частоты дипольной S_1 и полной S энергии сравниваются на рис. 3, а. Среднеарифметическое, среднеквадратичное и медианное значения для диполя соответствует характерному времени около тысячи лет, за которые дипольная энергия E_1

уменьшится в e раз. Соответственно, полная энергия E уменьшается медленнее – за пару тысяч лет. Малые среднеквадратические отклонения частот также соответствуют характерным временам порядка одной-двух тысяч лет, что согласуется с основными характерными временами геодинамики [5, 25 и ссылки в них].

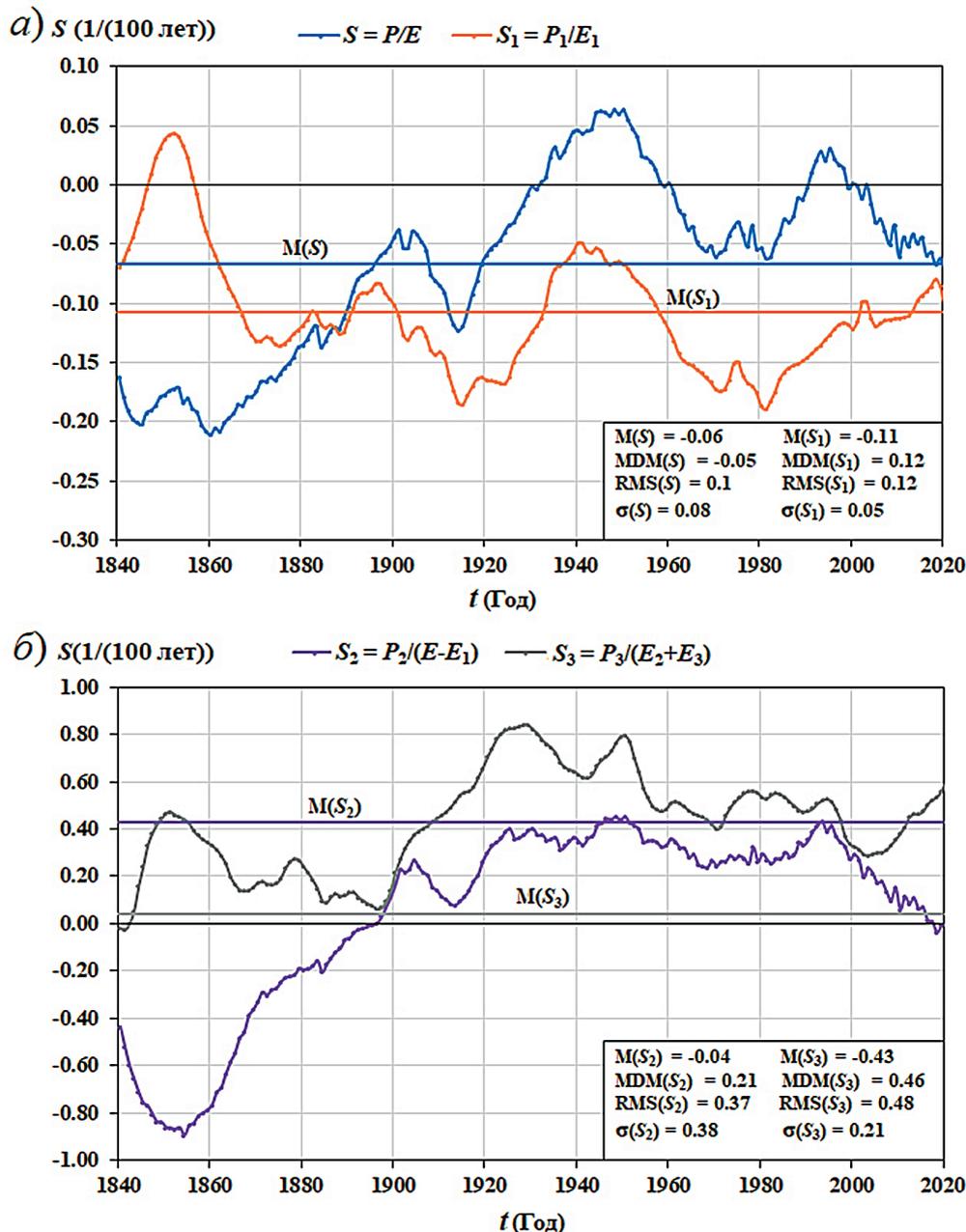


Рис. 3. Эволюционные графики удельной вариации или частоты геомагнитного поля: а) общая суммарная вариация $S = P/E$ и дипольная вариация $S_1 = P_1/E_1$; б) недипольная вариация $S_2 = P_2/(E - E_1)$ и вариация суммы двух недипольных гармоник – октупольной и квадрупольной $S_3 = P_3/(E_2 + E_3)$. Во вставках отображены соответствующие статистические значения, аналогичные представленным на рис. 2

Частоты полной недипольной S_2 и «урезанной» до суммы квадруполь-октуполь S_3 энергий сравниваются на рис. 3, б. Среднеквадратичное и медианное значения для S_2 соответствуют характерным временам около 400 лет, за которые недипольная энергия $E - E_1$ увеличивается примерно в e раз. Соответственно, «урезанная» недипольная энергия $E_2 + E_3$ растет быстрее – за пару сотен лет. Среднеарифметические значения для этих недипольных компонент значимо отличаются. Это приводит к характерным усредненным временам для S_2 около 2500 лет, а для S_3 примерно в десять раз меньше.

1.4. Обсуждение результатов. Проведено исследование полной, дипольной и недипольной энергий потенциальной части геомагнитного поля, которые практически полностью и с хорошей точностью нам доступны из непосредственных наблюдений и палеомагнитных реконструкций. На базе непосредственных наблюдений с 1840 по 2020 г. (в рамках модели COV-OBS.x2 из работы [16]), проведен сравнительный эволюционный анализ вышеозначенных энергий за этот период.

Сопоставив полную и дипольную энергии, мы пришли к выводу, что дипольная энергия вполне представительна для адекватного моделирования полной энергии. Таким образом, палеомагнитные исследования, которые в первую очередь и преимущественно исследуют диполь, вполне могут соотноситься с глобальными свойствами геодинамо. Вместе с тем, разумеется, остается не до конца решенной проблема переноса полученных нами на сравнительно коротком временном интервале результатов на более длительные периоды, изучаемые в палеомагнетизме. Эту проблему можно решать, систематически сравнивая свойства кратковременных и долговременных моделей, как, например, это было сделано в работе [26]. Мы ограничились постулированием гипотезы эргодичности (возможно, частичной) – см. во введении выше. Эволюция временных производных или мощностей от полной и дипольной энергии частично подтверждают эту гипотезу статистически, поскольку в обоих случаях получаются энергии порядка ста МВт и характерные времена порядка тысячи лет (физические основы для таких мощностей и временных интервалов см., например, в работах [27, 28]). Однако несколько беспокоит то, что примерно с 1900 г. полная и дипольная энергии эволюционируют (рис. 2, а) достаточно синхронно, а позже наблюдается потеря подобной синхронизации. Еще в большей степени такая потеря наблюдается при сравнении полной недипольной энергии с «урезанной» недипольной энергией, которая обусловлена только квадруполем и октуполем (рис. 2, б). Эта «урезанность» преимущественно используется в палеомагнетизме (а то и вовсе ограничиваются лишь квадруполем) для описания недипольной составляющей. К сожалению, проведенные нами исследования свидетельствуют о том, что такая «урезанная» энергия лишь частично воспроизводит свойства всей недипольной энергии. Хотя обе эти энергии характеризуются мощностью порядка 100 МВт и эта величина сравнима с мощностью для полной и дипольной энергии, во всех других эволюционных, статистических и частотных характеристиках наблюдается заметная разница между «урезанной» и полной энергиями.

В нашем исследовании применена общедоступная и достаточно точная модель COV-OBS.x2 из работы [16], охватывающая временной период 1840–2020 гг. Перенос полученных результатов на более длительные периоды возможен только по порядку величины, так как для обоснования такого переноса необходимо

оценить сопутствующие ошибки путем сравнения с другими наблюдательными, палеомагнитными моделями геомагнитного поля, а также численными моделями геодинамо. Нам известна лишь одна работа в сходном направлении [26], в которой по еще более коротким спутниковым данным с привлечением численных моделей геодинамо делается обобщение на более длительные интервалы времени (до миллионов лет). Для предлагаемого нами подхода в первую очередь было бы оправданно сравнение с другими историческими моделями [2, 3, 23], подобно тому, как это было сделано в работе [9]. Не менее содержательным представляется привлечение соответствующих археомагнитных и/или палеомагнитных моделей. Частично это можно сделать на основе работы [18], в которой показано, что на временном интервале с 1600 по 1840 г. происходило увеличение величины геомагнитного осевого диполя. Соответственно, наша удельная вариация или частота (рис. 3, *a*) была положительна в этот период, но поменяла знак вскоре после 1840 г. При этом абсолютная величина этой частоты в среднем соответствует характерному времени порядка тысячи лет, что хорошо согласуется с предлагаемым подходом. Аналогичные величины для характерных времен диполя порядка тысячи лет следуют и из многих палеомагнитных реконструкций и геодинамо-моделей [5, 13, 17, 20, 21, 24, 25]. Однако в доступной нам литературе отсутствует оценка недипольных характерных времен, которые, согласно примененному подходу, оказались в несколько раз меньше – порядка сотен лет. Поэтому представляется актуальным продолжить работу по более детальному сравнительному анализу различных моделей с целью выявления характерных временных «подписей» для дипольных и недипольных компонент магнитной энергии.

Заключение

В работе на временном интервале с 1840 по 2020 г., возможно, впервые исследованы дипольные и недипольные составляющие суммарной магнитной энергии наблюдаемого потенциального поля (до границы с ядром Земли) и соответствующих мощностей, которые являются временными производными от этих энергий. Под недипольным полем подразумеваются остаток после вычета дипольных составляющих из общего поля и отдельные составляющие – «урезанная» версия, состоящая из квадруполь и октуполь. Такая версия естественным образом используется в палеомагнитных моделях, в которых октуполь – это максимальная детализация. С помощью сравнительного метода исследованы детали эволюции, простейшие статистические и частотные характеристики всех упомянутых составляющих.

Проведенные исследования показали, что дипольная энергия (~5 ЭДж) примерно в три раза превышает недипольную, опровергая практически общепринятое положение о том, что дипольная составляющая геомагнитной энергии превосходит недипольную более чем на порядок. При этом дипольная составляющая выделяется достаточным образом, чтобы оставаться репрезентативной для всей суммарной энергии. Производная энергии от времени, или мощность, более вариативна по сравнению с энергией. Порядок величины этой мощности невелик как для дипольной, так и для недипольной, и составляет около 100 МВт. Интересно отметить, что это всего лишь величина, достижимая для обыкновенной, хотя и достаточно крупной электростанции. А мощность всего геодинамо примерно на четыре порядка больше, поскольку основное магнитное поле полностью от нас скрыто в глубинных недрах ядра Земли [5, 25].

Частота, полученная делением мощности на дипольную энергию, соответствует периодам порядка тысячи лет и хорошо согласуется с палеомагнитными реконструкциями и геодинамо моделями [5, 13, 17, 20, 21, 24, 25]. При делении мощности на недипольную энергию найдены ранее не идентифицированные, в несколько раз меньшие периоды, поскольку недипольные составляющие в несколько раз меньше дипольных. При этом «поведение» всего недипольного поля существенно отличается от его «урезанной» части. «Урезанная» часть почти монотонно растет, а полная – осциллирует, демонстрируя при этом статистические и частотные параметры, отличающиеся от «урезанной». Поэтому, к сожалению, палеомагнитные исследования не смогут претендовать на уверенную идентификацию всего недипольного поля, но продолжение работы по выявлению важнейших (например, для описания поля во время экскурса или инверсии) его частей является актуальным.

Главный недостаток работы заключается в том, что она основана только на одной исторической модели [16], что практически не позволяет адекватно оценить ошибки полученных результатов. Для устранения этого недостатка в дальнейшем планируется привлечение других наблюдательных, палеомагнитных моделей геомагнитного поля, а также численных моделей геодинамо.

Благодарности. Работа выполнена за счет бюджета ИЗМИРАН в рамках госфинансирования по теме программы ФНИ ГАН «Исследование магнетизма Земли и планет» (No 0037-2014-0004).

Литература

1. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Издательство ЛГУ, 1978. 591 с.
2. Jackson A., Jonkers A.R.T., Walker M.R. Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2000. V. A358. P. 957–990. <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0569>.
3. Thebaud E., Finlay C.C., Beggan C.D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coisson P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lalanne X., Langlais B., Leger J.-M., Lesur V., Lowes F.J., Macmillan S., Manda M., Manoj C., Maus S., Olsen N., Petrov V., Ridley V., Rother M., Sabaka T.J., Saturnino D., Schachtschneider R., Sirol O., Tangborn A., Thomson A., Toffner-Clausen L., Vigneron P., Wardinski I., Zvereva T. International geomagnetic reference field: The 12th generation // *Earth Planets Space*. 2015. V. 67, No 1. Art. 79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>.
4. Lowes F.J. Spatial power spectrum of the main geomagnetic field, and extrapolation to the core // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1974. V. 36, No 3. P. 717–730. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1974.tb00622.x>.
5. Schaeffer N., Jault D., Nataf H.-C., Fournier A. Turbulent geodynamo simulations: A leap towards Earth's core // *Geophys. J. Int.* 2017. V. 211, No 1. P. 1–29. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx265>.
6. Mauersberger P. Das Mittel der Energiedichte des geomagnetischen Hauptfeldes an der Erdoberfläche und seine sakulare Änderung // *Gerlands Beitr. Geophys.* 1956. V. 65. P. 207–215.
7. Lowes F.J. Mean-square values on sphere of spherical harmonic vector fields // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71, No 8. P. 2179–2179. <https://doi.org/10.1029/JZ071i008p02179>.
8. Bayanjargal G. The total energy of geomagnetic field // *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.* 2015. V. 1, No 1–2. P. 29–33. <https://doi.org/10.1007/s40948-015-0006-y>.

9. *Старченко С.В., Яковлева С.В.* Спектры энергии и мощности потенциального геомагнитного поля с 1840 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59, № 2. С. 258–264. <https://doi.org/10.1134/S0016794019010127>.
10. *Старченко С.В., Яковлева С.В.* Определение удельных временных вариаций энергии потенциального геомагнитного поля из IGRF модели // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59, № 5. С. 649–654. <https://doi.org/10.1134/S0016794019050122>.
11. *Gillet N., Barrois O., Finlay C.C.* Stochastic forecasting of the geomagnetic field from the COV-OBS.x1 geomagnetic field model, and candidate models for IGRF-12 // Earth, Planet and Space. 2015. V. 67, No 1. Art. 71. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0225-z>.
12. *De Santis A., Qamili E., Cianchini G.* Ergodicity of the recent geomagnetic field // Phys. Earth Planet. Inter. 2011. V. 186, No 3–4. P. 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2011.04.008>.
13. *Shebalin J.V.* Magnetohydrodynamic turbulence and the geodynamo // Phys. Earth Planet. Inter. 2018. V. 285. P. 59–75. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2018.10.008>.
14. *Shebalin J.V.* Magnetic helicity and the geodynamo // Fluids. 2021. V. 6, No 3. Art. 99. <https://doi.org/10.3390/fluids6030099>.
15. *Shebalin J.V.* Broken ergodicity in magnetohydrodynamic turbulence // Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. 2013. V. 107, No 4. P. 411–466. <https://doi.org/10.1080/03091929.2011.589385>.
16. *Huder L., Gillet N., Finlay C.C., Hammer M.D., Tchoungui H.* COV-OBS.x2: 180 years of geomagnetic field evolution from ground-based and satellite observations // Earth, Planets and Space. 2020. V. 72, No 1. Art. 160. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01194-2>.
17. *Нечасова И.Е., Пулипенко О.В.* Археомангнитные исследования в Институте физики земли им. О.Ю. Шмидта (исторический обзор, основные результаты) // Физика Земли. 2019. № 2. С. 123–136. <https://doi.org/10.31857/S0002-333720192123-136>.
18. *Troyano M., Gallet Y., Genevey A., Pavlov V., Fournier A., Lagroix F., Niyazova M., Mirzaakhmedov D.* Analyzing the geomagnetic axial dipole field moment over the historical period from new archeointensity results at Bukhara (Uzbekistan, Central Asia) // Phys. Earth Planet. Inter. 2021. V. 310. Art. 106633. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106633>.
19. *Khokhlov A.V., Shcherbakov V.P., Lhuillier F.* Using the giant Gaussian process model from paleodirectional and paleointensity data to investigate paleomagnetic secular variation // Russ. J. Earth Sci. 2020. V. 20, No 6. Art. ES6013. <http://doi.org/10.2205/2020ES000710>
20. *Morzfeld M., Buffett B.A.* A comprehensive model for the kyr and Myr timescales of Earth's axial magnetic dipole field // Nonlin. Processes Geophys. 2019. V. 26, No 3. P. 123–142. <https://doi.org/10.5194/npg-26-123-2019>.
21. *Panovska S., Constable C.G., Korte M.* Extending global continuous geomagnetic field reconstructions on timescales beyond human civilization // Geochem. Geophys. Geosystems. 2018. V. 19, No 12. P. 4757–4772. <https://doi.org/10.1029/2018GC007966>.
22. *Щербатов В.П., Хохлов А.В., Сычева Н.К.* Анализ гипотезы большого Гауссова процесса как способа описания вековых вариаций вектора геомагнитного поля // Физика Земли. 2019. № 1. С. 214–228. <https://doi.org/10.31857/S0002-333720191214-228>.
23. *Arneitz P., Leonhardt R., Egli R., Fabian K.* Dipole and nondipole evolution of the historical geomagnetic field from instrumental, archeomagnetic, and volcanic data // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2021. V. 126, No 10. Art. e2021JB022565. <https://doi.org/10.1029/2021JB022565>.
24. *Panovska S., Finlay C.C., Hirt A.M.* Observed periodicities and the spectrum of field variations in Holocene magnetic records // Earth Planet. Sci. Lett. 2013. V. 379. P. 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.08.010>.
25. *Starichenko S.V.* Analytic scaling laws in planetary dynamo models // Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. 2019. V. 113, No 1–2. P. 71–79. <https://doi.org/10.1080/03091929.2018.1551531>.

26. *Bouligand C., Gillet N., Jault D., Schaeffer N., Fournier A., Aubert J.* Frequency spectrum of the geomagnetic field harmonic coefficients from dynamo simulations // *Geophys. J. Int.* 2016. V. 207, No 2. P. 1142–1157. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw326>.
27. *Старченко С.В., Смирнов А.Ю.* Объемные токи современного магнитного диполя в ядре Земли // *Физика Земли.* 2021. № 4. С. 42–46. <https://doi.org/10.31857/S0002333721040086>.
28. *Старченко С.В.* Гармонические источники главного геомагнитного поля // *Геомагнетизм и Аэрономия.* 2011. Т. 51, № 3. С. 412–418.

Поступила в редакцию 22.09.2023

Принята к публикации 01.11.2023

Старченко Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

Калужское шоссе, д. 4, г. Троицк, г. Москва, 108840, Россия

E-mail: sstarchenko@mail.ru

Яковлева Светлана Витальевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

Калужское шоссе, д. 4, г. Троицк, г. Москва, 108840, Россия

E-mail: svyakov@inbox.ru

ISSN 2542-064X (Print)

ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2023, vol. 165, no. 4, pp. 606–619

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.606-619

Comparative Evolutionary Analysis of Dipole and Non-Dipole Components of Geomagnetic Energy

S.V. Starchenko, S.V. Yakovleva***

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, 108840 Russia

E-mail: **sstarchenko@mail.ru, **svyakov@inbox.ru*

Received September 22, 2023; Accepted November 1, 2023

Abstract

The total energy of the potential geomagnetic field (up to the core-mantle boundary) is divided into dipole and non-dipole parts, which are determined by their evolution and frequency properties. The calculations presented here are based on the available and sufficiently reliable COV-OBS.x2 geomagnetic field model that covers the period of 1840–2020. The proposed approximations for longer periods are preliminary, as further work is required to estimate errors through comparison with other historical observational and paleomagnetic models of the geomagnetic field, as well as with numerical models of

the geodynamo. The actual dipole energy (about 5 EJ) turned out to be only three times higher than the non-dipole energy, rather than the previously reported one order or more. It was found that the dipole energy decreases relatively slowly and monotonically, while the non-dipole part changes much faster and quasi-periodically. Therefore, the characteristic times are on the order of one thousand years for the dipole component and on the order of hundreds of years for the non-dipole component, respectively. If the quadrupole and octupole contributions to the geomagnetic field are only considered, which is a natural limitation for paleo- and archaeomagnetologists, then the energy of such a “truncated” non-dipole part increases monotonically, and its evolutionary and frequency characteristics become different from the full (up to the 14th spherical harmonic) non-dipole part. The results show that the power or the time derivative of energy varies more significantly compared to the energy, being on the order of one hundred MW for both the dipole and non-dipole parts. Frequency values were obtained by analyzing the power/energy ratios.

Keywords: geomagnetic energy, dipole, non-dipole, evolution, comparison

Acknowledgements. This study was supported by the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences as part of state funding under the Program of Basic Scientific Research of State Academies of Sciences “Research on the Magnetism of the Earth and Planets” (project no. 0037-2014-0004).

Figure Captions

Fig. 1. Evolutions of the geomagnetic field energy: total energy ($E = E_1 + E_2 + \dots + E_{14}$), dipole energy (E_1), non-dipole energy ($E - E_1$), and the sum of octupole and quadrupole energy ($E_2 + E_3$).

Fig. 2. Comparative evolutions of various components of the geomagnetic field power: a) total power $P = dE/dt$ and dipole power $P_1 = dE_1/dt$; b) the power of the entire non-dipole field $P_2 = d(E - E_1)/dt$ and the total power of two non-dipole components $P_3 = d(E_2 + E_3)/dt$. The insets show the statistical values: M – arithmetic mean, MDM – median, RMS – root mean square, and σ – standard deviation.

Fig. 3. Evolutions of the “unit” variation or “frequency” of the geomagnetic field: a) total variation $S = P/E$ and dipole variation $S_1 = P_1/E_1$; b) non-dipole variation $S_2 = P_2/(E - E_1)$ and variation of the sum of two, octupole and quadrupole, non-dipole harmonics $S_3 = P_3/(E_2 + E_3)$. The insets show the corresponding statistical values similar to those in Fig. 2.

References

1. Yanovskii B.M. *Zemnoi magnetizm* [Terrestrial Magnetism]. Leningrad, Izd. LGU, 1978. 591 p. (In Russian)
2. Jackson A., Jonkers A.R.T., Walker M.R. Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records. *Philos. Trans. R. Soc., A*, 2000, vol. 358, no. 1768, pp. 957–990. <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0569>.
3. Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coïsson P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lalanne X., Langlais B., Léger J.-M., Lesur V., Lowes F.J., Macmillan S., Manda M., Manoj C., Maus S., Olsen N., Petrov V., Ridley V., Rother M., Sabaka T.J., Saturnino D., Schachtschneider R., Sirol O., Tangborn A., Thomson A., Toffner-Clausen L., Vigneron P., Wardinski I., Zvereva T. International geomagnetic reference field: The 12th generation. *Earth, Planets Space*, 2015, vol. 67, no. 1, art. 79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>.
4. Lowes F.J. Spatial power spectrum of the main geomagnetic field, and extrapolation to the core. *Geophys. J. Int.*, 1974, vol. 36, no. 3, pp. 717–730. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1974.tb00622.x>.
5. Schaeffer N., Jault D., Nataf H.-C., Fournier A. Turbulent geodynamo simulations: A leap towards Earth’s core. *Geophys. J. Int.*, 2017, vol. 211, no. 1, pp. 1–29. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx265>.
6. Mauersberger P. Das Mittel der Energiedichte des geomagnetischen Hauptfeldes an der Erdoberfläche und seine säkulare Änderung. *Gerlands Beitr. Geophys.*, 1956, Bd. 65, S. 207–215. (In German)
7. Lowes F.J. Mean-square values on sphere of spherical harmonic vector fields. *J. Geophys. Res.*, 1966, vol. 71, no. 8, pp. 2179–2179. <https://doi.org/10.1029/JZ071i008p02179>.

8. Bayanjargal G. The total energy of geomagnetic field. *Geomech. Geophys. Geo-Energy Geo-Resour.*, 2015, vol. 1, nos. 1–2, pp. 29–33. <https://doi.org/10.1007/s40948-015-0006-y>.
9. Starchenko S.V., Yakovleva S.V. Energy and power spectra of the potential geomagnetic field since 1840. *Geomagn. Aeron.*, 2019, vol. 59, no. 2, pp. 242–248. <https://doi.org/10.1134/S0016793219010122>.
10. Starchenko S.V., Yakovleva S.V. Determination of specific time variations in the energy of the Earth's magnetic potential field from the IGRF model. *Geomagn. Aeron.*, 2019, vol. 59, no. 5, pp. 606–611. <https://doi.org/10.1134/S0016793219050128>.
11. Gillet N., Barrois O., Finlay C.C. Stochastic forecasting of the geomagnetic field from the COV-OBS.x1 geomagnetic field model, and candidate models for IGRF-12. *Earth, Planets Space*, 2015, vol. 67, no. 1, art. 71. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0225-z>.
12. De Santis A., Qamili E., Cianchini G. Ergodicity of the recent geomagnetic field. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2011, vol. 186, nos. 3–4, pp. 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2011.04.008>.
13. Shebalin J.V. Magnetohydrodynamic turbulence and the geodynamo. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2018, vol. 285, pp. 59–75. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2018.10.008>.
14. Shebalin J.V. Magnetic helicity and the geodynamo. *Fluids*, 2021, vol. 6, no. 3, art. 99. <https://doi.org/10.3390/fluids6030099>.
15. Shebalin J.V. Broken ergodicity in magnetohydrodynamic turbulence. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 2013, vol. 107, no. 4, pp. 411–466. <https://doi.org/10.1080/03091929.2011.589385>.
16. Huder L., Gillet N., Finlay C.C., Hammer M.D., Tchoingui H. COV-OBS.x2: 180 years of geomagnetic field evolution from ground-based and satellite observations. *Earth, Planets Space*, 2020, vol. 72, no. 1, art. 160. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01194-2>.
17. Nachasova I.E., Pilipenko O.V. Archaeomagnetic studies at Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences: History and main results. *Izv., Phys. Solid Earth*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 298–310. <https://doi.org/10.1134/S1069351319020071>.
18. Troyano M., Gallet Y., Genevey A., Pavlov V., Fournier A., Lagroix F., Niyazova M., Mirzaakhmedov D. Analyzing the geomagnetic axial dipole field moment over the historical period from new archeointensity results at Bukhara (Uzbekistan, Central Asia). *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2021, vol. 310, art. 106633. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106633>.
19. Khokhlov A.V., Shcherbakov V.P., Lhuillier F. Using the giant Gaussian process model from paleodirectional and paleointensity data to investigate paleomagnetic secular variation. *Russ. J. Earth Sci.*, 2020, vol. 20, no. 6, art. ES6013. <http://doi.org/10.2205/2020ES000710>.
20. Morzfeld M., Buffett B.A. A comprehensive model for the kyr and Myr timescales of Earth's axial magnetic dipole field. *Nonlinear Processes Geophys.*, 2019, vol. 26, no. 3, pp. 123–142. <https://doi.org/10.5194/npg-26-123-2019>.
21. Panovska S., Constable C.G., Korte M. Extending global continuous geomagnetic field reconstructions on timescales beyond human civilization. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 2018, vol. 19, no. 12, pp. 4757–4772. <https://doi.org/10.1029/2018GC007966>.
22. Shcherbakov V.P., Khokhlov A.V., Sycheva N.K. Analysis of the hypothesis of a Giant Gaussian Process as a means for describing secular variations of the geomagnetic field vector. *Izv., Phys. Solid Earth*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 182–194. <https://doi.org/10.1134/S1069351319010099>.
23. Arneitz P., Leonhardt R., Egli R., Fabian K. Dipole and nondipole evolution of the historical geomagnetic field from instrumental, archeomagnetic, and volcanic data. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2021, vol. 126, no. 10, art. e2021JB022565. <https://doi.org/10.1029/2021JB022565>.
24. Panovska S., Finlay C.C., Hirt A.M. Observed periodicities and the spectrum of field variations in Holocene magnetic records. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2013, vol. 379, pp. 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.08.010>.
25. Starchenko S.V. Analytic scaling laws in planetary dynamo models. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 2019, vol. 113, nos. 1–2, pp. 71–79. <https://doi.org/10.1080/03091929.2018.1551531>.
26. Bouligand C., Gillet N., Jault D., Schaeffer N., Fournier A., Aubert J. Frequency spectrum of the geomagnetic field harmonic coefficients from dynamo simulations. *Geophys. J. Int.*, 2016, vol. 207, no. 2, pp. 1142–1157. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw326>.

-
27. Starchenko S.V., Smirnov A.Yu. Volume currents of present-day magnetic dipole in the Earth's core. *Izv., Phys. Solid Earth*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 474–478. <https://doi.org/10.1134/S106935132104008X>.
28. Starchenko S.V. Harmonic sources of the main geomagnetic field in the Earth's core. *Geomagn. Aeron.*, 2011, vol. 51, no. 3, pp. 409–414. <https://doi.org/10.1134/S0016793211030169>.
-

⟨ **Для цитирования:** Старченко С.В., Яковлева С.В. Сравнительный эволюционный анализ дипольных и недипольных компонент геомагнитной энергии // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 606–619. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.606-619>. ⟩

⟨ **For citation:** Starchenko S.V., Yakovleva S.V. Comparative evolutionary analysis of dipole and non-dipole components of geomagnetic energy. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 606–619. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.606-619>. (In Russian) ⟩

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 551.583.7

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.620-632

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ МАГНИТНО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА БЕЛОЕ (ЮЖНАЯ СИБИРЬ, РОССИЯ)

*А.Р. Юсупова, Н.Г. Нурғалиева, Д.М. Кузина, В.Ф. Сотникова,
Д.И. Муликова*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты предварительных исследований донных отложений озера Белое (Южная Сибирь, Россия), направленных на получение вариаций магнитно-минералогических показателей и интерпретацию влияющих на них геологических факторов. Проведен комплекс петромагнитных исследований, включающий измерение магнитной восприимчивости (МВ) образцов трех керновых колонок, получение кривых нормального остаточного намагничивания при непрерывном росте внешнего магнитного поля до 1.5 Тл для одной колонки, дифференциальный термомагнитный анализ по индуцированной намагниченности и сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) по выборочным образцам. По кривым нормального намагничивания проведено разделение магнитной составляющей на ферромагнитную, диа/парамагнитную и суперпарамагнитную компоненты и определен их вклад. Данные по МВ образцов всех колонок хорошо коррелируют между собой, что позволяет проводить их сопоставление. Магнитные минералы представлены магнетитом и пиритом, присутствие которых прослеживается почти по всему разрезу. На диаграмме Дзя–Данлопа изучаемые образцы представлены однодоменными (ОД) и псевдооднодоменными (ПОД) зернами. Вариативность магнитных компонент по разрезу говорит об изменяющихся условиях во время осадконакопления. Методом СЭМ обнаружены частицы, сходные по составу и морфологии с космогенными и вулканическими сферулами. На основе комплексного анализа данных выделена значимая граница плейстоцен–голоцен.

Ключевые слова: условия осадконакопления, космогенные частицы, плейстоцен-голоценовые осадки.

Введение

Изменение концентраций и состава зерен магнитного вещества, аккумулирующегося в донных отложениях озер, приводит к варьированию магнитных параметров. К их числу относятся магнитная восприимчивость (МВ), а также ее компоненты (ферро-, пара- и суперпарамагнитная) [1–3]. Магнитные параметры могут быть информативными и в отношении седиментационных и постседиментационных процессов, в числе которых перенос обломочного материала ледовыми, эоловыми и водными агентами, аутигенное формирование ферромагнитных сульфидов и оксидов железа, биогенная минерализация железа, чередующаяся с магнитными ансамблями обломочных зерен [1, 2, 4–6].

Интересной особенностью плейстоцен-голоценовых озерных осадочных летописей являются повышенные значения многих магнитных характеристик в плейстоценовых отложениях по сравнению с голоценовыми (например, в озерах Гранд, Грязевое, Большое, Соседнее, Водораздельное, Сапог [7] и Сабакты [8]), обусловленные особенным участием ледового и эолового агентов транспортировки магнитного обломочного материала в озерную котловину [3, 8, 9], а также, вероятно, более активным участием космогенного вещества, детектируемого в виде магнитных сферул и железоникелевых сплавов [10, 11]. Для такого железа характерен сильно выраженный ферромагнетизм с точкой Кюри ~700–750 °С [11, 12].

В настоящей работе представлены результаты предварительных магнитно-минералогических исследований озера Белое, расположенного на юго-западе Алтайского края (Южная Сибирь, Россия). В настоящее время на исследуемой территории изучены донные отложения лишь некоторых озер [1, 13], среди которых отсутствует вышеупомянутое озеро. В результате исследований установлены вариации магнитно-минералогических показателей и проведена предварительная интерпретация геологических факторов этих вариаций.

2. Материалы и методы исследований

Озеро Белое располагается на юго-западе Алтайского края (Южная Сибирь, Россия), у подножия северных склонов Колыванского хребта [14], который находится в Курьинском районе, на северо-востоке от г. Синюхи. Керн донных отложений озера Белое был получен в ходе научной экспедиции в августе 2022 г. сотрудниками Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета (КФУ). Отбор образцов для различных методов исследований проводили пробоотборником, подробно описанным в работе [15]. Шаг отбора составил 2 см. Проведено изучение трех керновых колонок, отобранных на основе предварительных сейсмоакустических исследований из центральной части озера в местах ненарушенной сплошности донных отложений. Основные характеристики колонок представлены в табл. 1.

Табл. 1.

Основные характеристики керновых колонок (глубина отбора ~6 м)

№ колонки	Широта	Долгота	Длина, см	Число образцов
1	51°17.5825'	82°39.0919'	492	248
2	51°17.4223'	82°39.1003'	452	241
3	51°17.4856'	82°39.1423'	518	250

Для всех образцов отобранных керновых колонок (табл. 1) была измерена МВ. На основе предварительных сейсмоакустических исследований и первичного литологического описания для детальных комплексных лабораторных исследований, проведенных в Институте геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета, была выбрана керновая колонка № 2. Для нее проведены коэрцитивная спектрометрия, дифференциальный термомагнитный анализ, а также получены изображения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Разрез колонки № 2 представлен снизу вверх плотными глинистыми беловато-серыми отложениями, сменяющимися слаболитифицированным серым и светло-серым илом. Растительный детрит установлен на отметках 196, 220, 230–250, 294 и 366 см. Раковинный детрит фиксируется на отметках 156–170, 262–282, 362 и 420 см.

МВ измерена для всех 739 отобранных образцов (табл. 1) при частоте 976 Гц и амплитуде поля 200 А/м с использованием многочастотного измерителя МВ Kappabridge MFK1-FA (AGICO, Чехия). Для указанных параметров чувствительность прибора составляет 2×10^{-8} SI. Диапазон измерения прибора достигает 0.5 (SI) при частоте 976 Гц. Точность в пределах одного диапазона составляет $\pm 0.1\%$, а точность абсолютной калибровки – $\pm 3\%$.

Коэрцитивную спектрометрию проводили с помощью коэрцитивного спектрометра J_meter (Россия) [16–18]. Для образцов керновой колонки № 2 в автоматическом режиме измеряли кривые нормального остаточного намагничивания при непрерывном росте внешнего магнитного поля до 1.5 Тл. Получены полные петли гистерезиса одновременно по остаточной и индуктивной намагниченностям. По кривым нормального намагничивания определен вклад в магнитную составляющую осадка различных магнитных компонент озерных отложений: ферромагнитной (χ_f), диа-/парамагнитной (χ_p) и суперпарамагнитной (χ_{sp}), согласно методике, описанной в работах [8, 19].

Дифференциальный термомагнитный анализ образцов керновой колонки № 2 по индуцированной намагниченности выполняли на авторегистрирующих крутильных магнитных весах, действующих по нулевому методу [16].

Для изучения морфологии и элементного состава минеральных частиц донных отложений озера Белое использовали автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп Merlin™ (Carl Zeiss, Германия), оснащенный детектором элементного анализа Aztec X-MAX 80. Спектральное разрешение составляло 127 эВ. Образцы помещали на углеродный скотч.

3. Результаты и их обсуждение

Измеренные значения МВ по образцам керновой колонки № 1 изменяются в интервале от 0.264×10^{-7} до 13.400×10^{-7} м³/кг, а среднее значение составляет 1.01×10^{-7} м³/кг. Значения МВ образцов керновой колонки № 2 изменяются в диапазоне $(0.289–5.340) \times 10^{-7}$ м³/кг со средним значением 0.862×10^{-7} м³/кг. МВ образцов керновой колонки № 3 варьируется от 0.160×10^{-7} до 5.790×10^{-7} м³/кг со средним значением 0.796×10^{-7} м³/кг. Сопоставление вариаций величины МВ по трем отобранным колонкам представлено на рис. 1. Повышенные значения МВ в нижней части разреза (интервал 500–444, 414–182 и 512–448 см для керновых колонок № 1, № 2 и № 3 соответственно) (рис. 1, а) свидетельствуют о значительном содержании магнитного вещества и указывают предположительно на плейстоценовый возраст этой части разреза [7, 8].

Построенная диаграмма Дзя-Данлопа [20–21] (рис. 1, б) позволила установить, что изучаемые образцы керновой колонки № 2 делятся на две группы. Первая группа представлена образцами интервала глубин 482–438 см (однодоменные зерна (ОД) (синие точки)). Вторая группа представлена образцами интервала глубин 436–2 см (псевдооднодоменные зерна (ПОД) (красные точки)). Таким образом, только в предположительно плейстоценовых отложениях детектируется магнитный материал, сложенный однодоменными зернами.

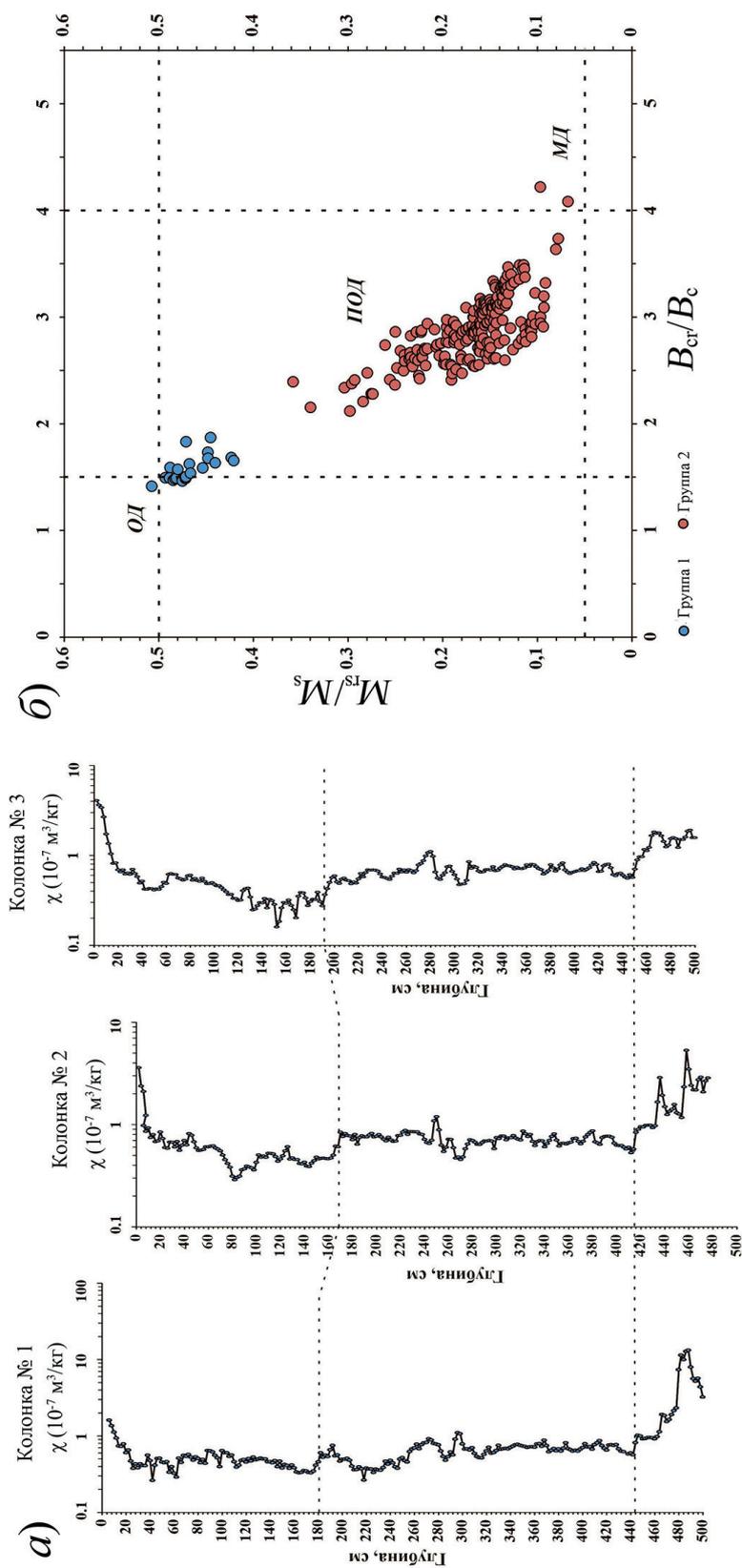


Рис. 1. а) Вариации величины МВ по трем колонкам ядра озера Белое; б) диаграмма Дэй–Данлопа [20–21] керновой колонки № 3 озера Белое. ОД – однодоменные, ПОД – псевдооднодоменные, МД – многодоменные зерна. Группа 1 – интервал 482–438 см (синие точки), группа 2 – интервал 436–2 см (красные точки)

На рис. 2 представлены результаты дифференциального термомагнитного анализа.

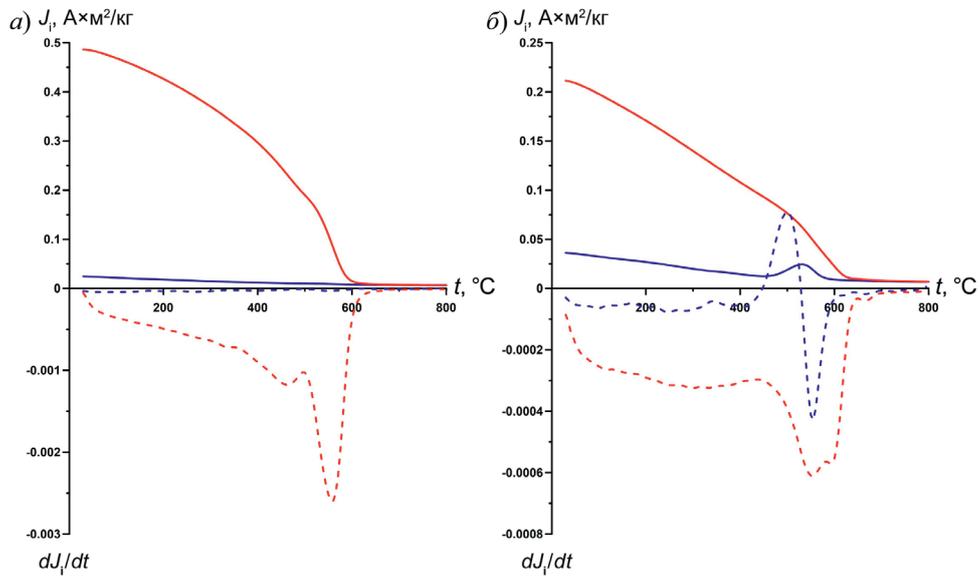


Рис. 2. Результаты дифференциального термомагнитного анализа керновой колонки № 2 (*a* – образец 490 (отметка 380 см), *б* – образец 522 (отметка 444 см)). Сплошные синяя и красная линии – первый и второй нагрев соответственно, пунктирные синяя и красная линии – дифференциалы первого и второго нагрева соответственно

Для всех образцов характерен рост намагниченности после первого нагрева, что говорит об образовании новых магнитных минералов. Для образцов из верхней части керна это, скорее всего, связано с образованием тонкодисперсного магнетита при горении органики (рис. 2, *a*). Для некоторых образцов это происходит вследствие преобразования пирита при нагревании. При температуре ~450 °С начинается диссоциация пирита и он переходит в магнетит. Поэтому сложно судить о первоначальном присутствии магнетита в осадке (рис. 2, *б*). Пирит распространен почти по всему разрезу.

На рис. 3 отображены вариации компонент МВ, статистические параметры которых представлены в табл. 2. Значения χ_{full} изменяются в интервале $(2.41-50.94) \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$, при этом χ_p варьируется в диапазоне $(1.66-7.73) \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\chi_f - (1.66-7.73) \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$ и $\chi_{sp} - (0.001-1.02) \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Табл. 2.

Статистические параметры компонент МВ керновой колонки № 2 донных отложений озера Белое

Параметр	$\chi_{full} (10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг})$	$\chi_p (10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг})$	$\chi_f (10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг})$	$\chi_{sp} (10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг})$
Минимальное значение	2.41	1.66	0.54	0.001
Максимальное значение	50.94	7.73	42.57	1.02
Среднее значение	7.11	4.14	2.94	0.038
Стандартное отклонение	6.06	1.37	5.30	0.09

На графиках вариаций компонент МВ (рис. 3) установлены повышенные значения последних в условно плейстоценовых отложениях по сравнению с вышележащими голоценовыми отложениями.

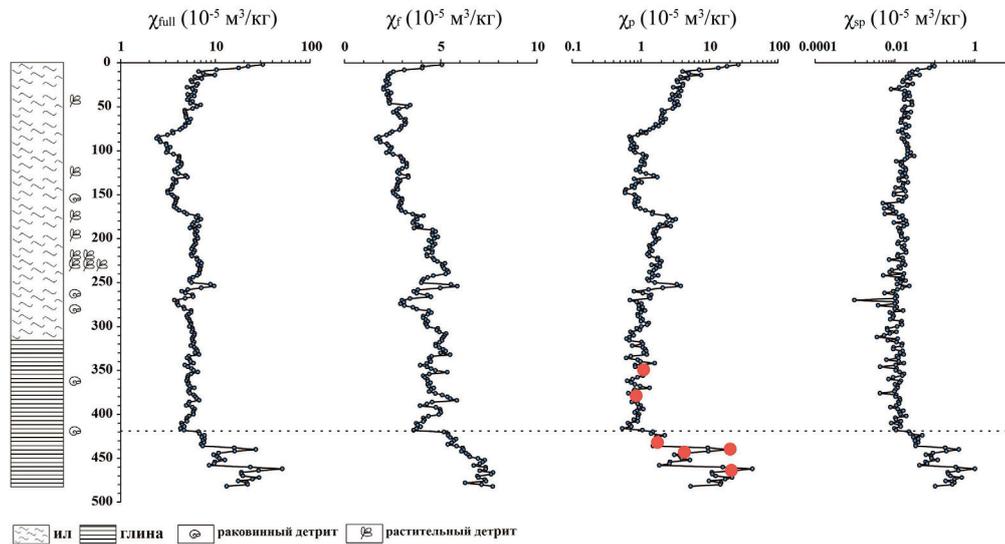


Рис. 3. Вариации компонент МВ по образцам колонки № 2 осадков озера Белое. Красным обозначены точки, отобранные для исследований методом СЭМ

По данным СЭМ установлено наличие железных сферул и чешуек с примесями Cr, Ni (2–10%) и в меньшей степени Mn, Al, Zn, Si и других элементов (до 1%). По структуре и составу некоторые частицы можно отнести к космогенным (рис. 4, а и б). Они в большей степени распространены в предположительно плейстоценовых отложениях по сравнению с вышележащими отложениями, где такие частицы не обнаружены. На остальных СЭМ-изображениях (рис. 4, в–д) видно, что поверхность более бугристая, что типично для вулканических сферул. Это часто встречается, если породы вокруг озера являются вулканогенными. Для представленных образцов размываемыми породами являются осадочные, вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования Алтае-Саянской и Обь-Зайсанской складчатых областей [22]. Предположительно космогенные частицы (сферулы и железоникелевые частицы [11, 23, 24]) распространены в плейстоценовых донных осадках других озер, например, озер Банное и Турго-як (рис. 4, е и ж). Присутствие космогенных частиц можно объяснить с помощью гипотезы о метеоритных взрывах в позднечетвертичное время, особенно в плейстоцене [25, 26].

Наличие множества вулканических частиц может быть связано с интенсивным выветриванием пород водосбора и привнесом этого вещества в бассейн осадконакопления. Похожие частицы обнаружены и в других изученных авторами озерах, например, в озере Сабакты (рис. 4, з). Более детальный отбор образцов со всего разреза, микроскопическое изучение морфологии, химического состава и доменной структуры магнитных частиц позволят в будущем улучшить понимание их происхождения.

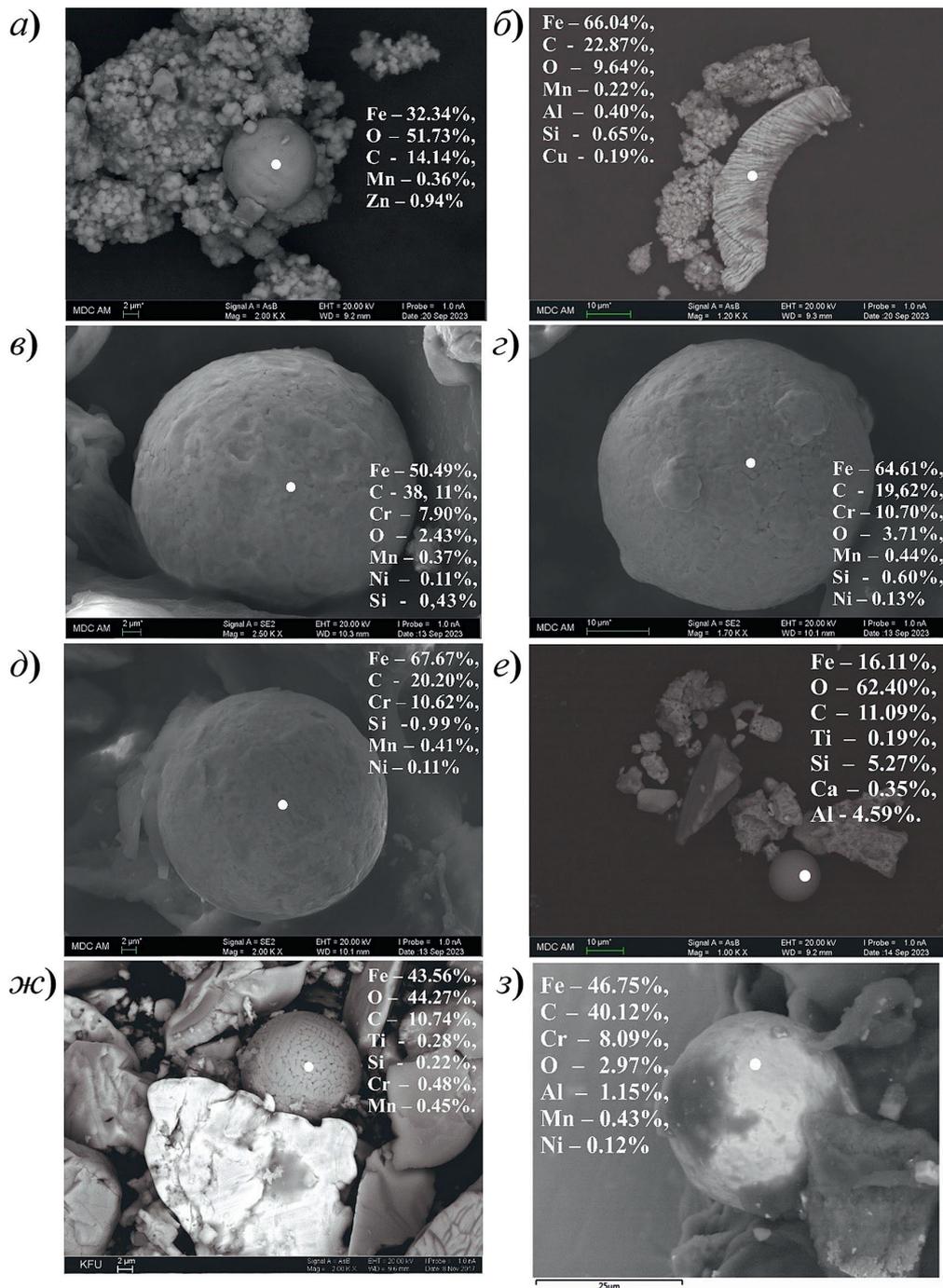


Рис. 4. СЭМ-изображения космических и вулканических частиц и содержание элементов (% атом.): а) озеро Белое, глубина 444 см; б) озеро Белое, глубина 444 см; в) озеро Белое, глубина 428 см; г) озеро Белое, глубина 428 см; д) озеро Белое, глубина 428 см; е) озеро Банное, глубина 508 см (~12 600 лет); ж) озеро Тургойак, глубина 520 см (более 20 000 лет); з) озеро Сабакты, глубина 234 см (~11 600 лет [8])

Заключение

Установлены значительные вариации величин МВ и ее компонент, позволяющие предположительно определить плейстоцен–голоценовый рубеж. Плейстоценовые отложения характеризуются повышенными значениями МВ и ее компонент (χ_p , χ_t и χ_{sp}). В составе магнитного материала этих отложений зафиксированы однодоменные зерна, а в вышележащих голоценовых отложениях – псевдооднодоменные.

На основе полученных результатов СЭМ сделано предположение о заметной роли магнитных сферул и железоникелевых частиц (космогенного и вулканического происхождения) в магнитной составляющей плейстоценовых отложений озера Белое.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 22-47-08001, <https://rscf.ru/project/22-47-08001/>.

Литература

1. Косарева Л.Р., Щербаков В.П., Нурғалиев Д.К., Нурғалиева Н.Г., Сычева Н.К., Антоненко В.В., Кузина Д.М., Евтюгин В.Г. Периодизация климатических циклов в голоцене по синхронным вариациям магнитных и геохимических параметров осадков озера Большое Яровое (юго-запад Сибири) // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, № 7. С. 889–907. <https://doi.org/10.15372/GiG2019148>.
2. Evans M.E., Heller F. Environmental Magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics. San Diego: Acad. Press, 2003. 299 p.
3. Liu Q., Roberts A.P., Larrasoańa J.C., Banerjee S.K., Guyodo Y., Tauxe L., Oldfield F. Environmental magnetism: Principles and applications // Rev. Geophys. 2012. V. 50, No 4. Art. RG4002. <https://doi.org/10.1029/2012RG000393>.
4. Berner R.A. A new geochemical classification of sedimentary environments // J. Sediment. Res. 1981. V. 51, No 2. P. 359–365. <https://doi.org/10.1306/212F7C7F-2B24-11D7-8648000102C1865D>.
5. Dong Y., Wu N., Li F., Huang L., Wen W. Time-transgressive nature of the magnetic susceptibility record across the Chinese Loess Plateau at the Pleistocene/Holocene transition // PLoS One. 2015. V. 10, No 7. Art. e0133541. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133541>.
6. Curtis C. Mineralogical consequences of organic matter degradation in sediments: Inorganic/organic diagenesis // Marine Clastic Sedimentology / Ed. by J.K. Leggett, G.G. Zuffa. Dordrecht: Springer, 1987. P. 108–123. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3241-8_6.
7. Минюк П.С., Пожидаева Д.К., Соцкая О.Т., Акинин В.В., Морозова М.А. Магнито-минералогические аномалии на границе плейстоцена и голоцена в озерных осадках Северо-Востока России // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 510, № 2. С. 194–200. <https://doi.org/10.31857/S2686739723600182>.
8. Юсупова А.Р., Нурғалиева Н.Г., Кузина Д.М., Косарева Л.Р., Юнусова Д.А. Особенности вещественного состава донных отложений озера Сабакты (Южный Урал) // Успехи современного естествознания. 2023. № 7. С. 72–81. <https://doi.org/10.17513/use.38074>.
9. Hu S., Goddu S.R., Herb C., Appel E., Gleixner G., Wang S., Yang X., Zhu X. Climate variability and its magnetic response recorded in a lacustrine sequence in Heqing basin at the SE Tibetan Plateau since 900 ka // Geophys. J. Int. 2015. V. 201, No 1. P. 444–458. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv033>.
10. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Минеральные индикаторы литогенеза. Сыктывкар: Геопринт, 2008. 564 с.

11. *Kuzina D.M., Yusupova A.R., Markov G.P., Nurgaliev D.K., Lemazina Yu.A., Vorob'ev V.V., Kadyrov R.I.* Micrometeorites from Lake Turgoyak, South Ural, Russia // *Meteorit. Planet. Sci.* 2018. V. 53, No S1. Art. 6306. P. A156. <https://doi.org/10.1111/maps.13146>.
12. *Буров Б.В., Ясонов П.Г.* Введение в дифференциальный термомагнитный анализ горных пород. Казань: Издательство Казанского университета, 1979. 159 с.
13. *Дарьин А.В., Калугин И.А.* Реконструкция климата Горного Алтая по данным литолого-геохимических исследований донных осадков озера Телецкое // *Известия Российской академии наук. Серия географическая.* 2012. № 6. С. 63–70. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2012-6-63-70>.
14. *Панин Е.Л., Панина Е.А., Шаров А.С.* Некоторые аспекты развития санаторно-курортной и туристической деятельности в Алтайском крае // *Экономика. Сервис. Туризм. Культура (ЭСТК-2003): сборник статей V Международной научно-практической конференции (Барнаул, 27-28 мая 2003 г.).* Барнаул: Издательство Алтайского государственного технического университета, 2003. С. 47–50.
15. *Борисов А.С.* Система технологического обеспечения палеомагнитных исследований отложений современных озер: автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Казань, 2004. 46 с.
16. *Буров Б.В., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г.* Палеомагнитный анализ. Казань: Издательство Казанского университета, 1986. 167 с.
17. *Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г.* Коэрцитивный спектрометр. Патент РФ на полезную модель. № 81805. 2009. Бюл. ФИПС № 9.
18. *Yasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov B.V., Heller F.* A modernized coercivity spectrometer // *Geol. Carpathica.* 1998. V. 49, No 3. P. 224–225.
19. *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 J. Earth Sci.* 2015. V. 4, No 1. P. 1–6.
20. *Day R., Fuller M., Schmidt V.A.* Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1977. V. 13, No 4. P. 260–267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X).
21. *Dunlop D.J.* Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2002. V. 107, No B3. P. EPM 4-1–EPM 4-22. <https://doi.org/10.1029/2001JB000486>.
22. *Литвинова Т.П., Тимофеева И.К., Кудрявцев И.В.* Отчет по объекту «Создание опережающих геофизических основ Госгеолкарты-1000/3». Книга 17 (М-44). СПб.: ВСЕГЕИ; РГФ, 2012.
23. *Глухов М.С.* Магнитные микросферулы: морфология, состав, принципы классификации: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Казань, 2022. 202 с.
24. *Кузина Д.М.* Космическое вещество в осадках и осадочных породах: методы диагностики и применение для решения геологических задач: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Казань, 2019. 183 с.
25. *Субетто Д.А., Леонтьев П.А., Серых Л.С., Андроников А.В., Назарова Л.Б., Кублицкий Ю.А.* Резкие/катастрофические природно-климатические изменения и явления на рубеже позднего неоплейстоцена и голоцена на Северо-Западе России // *Общество. Среда. Развитие.* 2016. № 2. С. 87–96.
26. *Jelinowska A., Tucholka P., Wieckowski K.* Magnetic properties of sediments in a Polish lake: Evidence of a relation between the rock-magnetic record and environmental changes in Late Pleistocene and Holocene sediments // *Geophys. J. Int.* 1997. V. 129, No 3. P. 727–736. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb04508.x>.

Поступила в редакцию 03.10.2023

Принята к публикации 01.12.2023

Юсупова Анастасия Рафаиловна, младший научный сотрудник НИЛ палеоклиматологии, палеоэкологии, палеомагнетизма Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *i@ajusupova.ru*

Нургалиева Нурия Гавазовна, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии нефти и газа Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *nouria.nourgalieva@kpfu.ru*

Кузина Диляра Мтыгулловна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник НИЛ палеоклиматологии, палеоэкологии, палеомагнетизма Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *di.kuzina@gmail.com*

Сотникова Василина Федоровна, инженер НИЛ «Гибридные оптические сенсоры» Института физики

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *vasilina0917@gmail.com*

Муликова Динара Илхомовна, лаборант-исследователь НИЛ палеоклиматологии, палеоэкологии, палеомагнетизма Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *dindirin8642@gmail.com*

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2023, vol. 165, no. 4, pp. 620–632

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.620-632

**Preliminary Magnetic Mineralogical Studies of Lake Beloe Sediments
(Southern Siberia, Russia)**

A.R. Yusupova^{}, N.G. Nurgalieva^{**}, D.M. Kuzina^{***}, V.F. Sotnikova^{****}, D.I. Mulikova^{*****}*

^aKazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

E-mail: ^{}i@ajusupova.ru, ^{**}nouria.nourgalieva@kpfu.ru, ^{***}di.kuzina@gmail.com,
^{****}vasilina0917@gmail.com, ^{*****}dindirin8642@gmail.com*

Received October 3, 2023; Accepted December 1, 2023

Abstract

This article overviews the results of a preliminary magnetic and mineralogical study of the bottom sediments of Lake Beloe (Southern Siberia, Russia). The magnetic and mineralogical properties of the sediments were examined. Their variations were correlated with geological factors. A comprehensive magnetic survey was performed: magnetic susceptibility of samples extracted from three sediment cores was measured; normal remanent magnetization in a continuously increasing external magnetic field of up to 1.5 T was calculated; differential thermomagnetic analysis was carried out based on induced

magnetization and scanning electron microscopy (SEM) for certain samples. The magnetic component was divided into three subcomponents based on the normal magnetization curves: ferromagnetic, dia-/paramagnetic, and superparamagnetic. The contribution of each subcomponent to the total magnetization was determined. It was found that the magnetic susceptibility values correlate well across all the studied cores, thus making it possible to compare them. Magnetite and pyrite turned out to be the magnetic minerals distributed throughout almost the entire section. In the Day–Dunlop plot, the studied samples are represented by single-domain (SD) and pseudo–single-domain (PSD) grains. The magnetic components vary consistently along the section, suggesting that the depositional environment underwent substantial changes. Particles similar in composition and morphology to cosmogenic and volcanic spherules were discovered using the SEM method. Based on the obtained results, the boundary between the Pleistocene and Holocene deposits was defined.

Keywords: sedimentation conditions, cosmogenic particles, Pleistocene-Holocene sediments

Acknowledgements. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 224708001, <https://rscf.ru/project/22-47-08001/>).

Figure Captions

Fig. 1. *a*) Variations in the magnetic susceptibility of three sediment cores from Lake Beloe; *b*) Day–Dunlop plot [20–21] of sediment core no. 3 from Lake Beloe. SD – single-domain grains, PSD – pseudo–single-domain grains, MD – multi-domain grains. Group 1 – the interval of 482–438 cm (blue dots), group 2 – 436–2 cm (red dots).

Fig. 2. Differential thermomagnetic analysis of sediment core no. 2 (*a* – sample no. 490 (depth 380 cm), *b* – sample no. 522 (depth 444 cm)). Solid blue and red lines are the first and second heating, respectively; dotted blue and red lines are the differentials of the first and second heating, respectively.

Fig. 3. Variations of the magnetic susceptibility components of sediment core no. 2 from Lake Beloe. The points selected for the SEM study are shown in red.

Fig. 4. SEM images of cosmic and volcanic particles and their atomic concentration (in at%): *a*) Lake Beloe, depth 444 cm; *b*) Lake Beloe, depth 444 cm; *c*) Lake Beloe, depth 428 cm; *d*) Lake Beloe, depth 428 cm; *e*) Lake Beloe, depth 428 cm; *f*) Lake Bannoe, depth 508 cm (~12 600 years old); *g*) Lake Turgoyak, depth 520 cm (more than 20 000 years old); *h*) Lake Sabakty, depth 234 cm (~11.600 years old [8]).

References

1. Kosareva L.R., Shcherbakov V.P., Nurgaliev D.K., Nurgalieva N.G., Sycheva N.K., Antonenko V.V., Kuzina D.M., Evtuyugin V.G. Periodization of Holocene climatic cycles based on synchronous variations in the magnetic and geochemical parameters of the sediments of Lake Bol'shoe Yarovoe (southwestern Siberia). *Geol. Geofiz.*, 2020, vol. 61, no. 7, pp. 889–907. <https://doi.org/10.15372/GiG2019148>. (In Russian)
2. Evans M.E., Heller F. *Environmental Magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics*. San Diego, Acad. Press, 2003. 299 p.
3. Liu Q., Roberts A.P., Larrasoana J.C., Banerjee S.K., Guyodo Y., Tauxe L., Oldfield F. Environmental magnetism: Principles and applications. *Rev. Geophys.*, 2012, vol. 50, no. 4, art. RG4002. <https://doi.org/10.1029/2012RG000393>.
4. Berner R.A. A new geochemical classification of sedimentary environments. *J. Sediment. Res.*, 1981, vol. 51, no. 2, pp. 359–365. <https://doi.org/10.1306/212F7C7F-2B24-11D7-8648000102C1865D>.
5. Dong Y., Wu N., Li F., Huang L., Wen W. Time-transgressive nature of the magnetic susceptibility record across the Chinese Loess Plateau at the Pleistocene/Holocene transition. *PLoS One*, 2015, vol. 10, no. 7, art. e0133541. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133541>.
6. Curtis C. Mineralogical consequences of organic matter degradation in sediments: Inorganic/organic diagenesis. In: Leggett J.K., Zuffa G.G. (Eds.) *Marine Clastic Sedimentology*. Dordrecht, Springer, 1987. pp. 108–123. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3241-8_6.

7. Minyuk P.S., Pozhidaeva D.S., Sotskaya O.T., Akinin V.V., Morozova M.A. Magnetic–mineralogical anomalies at the Pleistocene–Holocene boundary in lacustrine sediments of Northeastern Russia. *Dokl. Earth Sci.*, 2023, vol. 510, no. 2, pp. 453–458. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23600342>.
8. Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Kuzina D.M., Kosareva L.R., Yunusova D.A. Compositional characteristics of Lake Sabakty sediments (Southern Urals). *Usp. Sovrem. Estestvozn.*, 2023, no. 7, pp. 72–81. <https://doi.org/10.17513/use.38074>. (In Russian)
9. Hu S., Goddu S.R., Herb C., Appel E., Gleixner G., Wang S., Yang X., Zhu X. Climate variability and its magnetic response recorded in a lacustrine sequence in Heqing basin at the SE Tibetan Plateau since 900 ka. *Geophys. J. Int.*, 2015, vol. 201, no. 1, pp. 444–458. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv033>.
10. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Mineral'nye indikatory litogeneza* [Mineral Indicators of Lithogenesis]. Syktyvkar, Geoprint, 2008. 564 p. (In Russian)
11. Kuzina D.M., Yusupova A.R., Markov G.P., Nurgaliev D.K., Lemazina Yu.A., Vorob'ev V.V., Kadyrov R.I. Micrometeorites from Lake Turgoyak, South Ural, Russia. *Meteorit. Planet. Sci.*, 2018, vol. 53, no. S1, art. 6306, p. A156. <https://doi.org/10.1111/maps.13146>
12. Burov B.V., Yasonov P.G. *Vvedenie v differentsial'nyi termomagnitnyi analiz gornyykh porod* [Introduction to Differential Thermomagnetic Analysis of Rocks]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 1979. 159 p. (In Russian)
13. Dar'in A.V., Kalugin I.A. Climate reconstruction of the Altai Mountains inferred from the lithological and geochemical studies of Lake Teletskoye sediments. *Izv. Ross. Akad. Nauk. Ser. Geogr.*, 2012, no. 6, pp. 63–70. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2012-6-63-70>. (In Russian)
14. Panin E.L., Panina E.A., Sharov A.S. Some aspects of the development of health resorts and tourism in the Altai region. *Ekonomika. Servis. Turizm. Kul'tura (ESTK-2003): sbornik statei V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Barnaul, 27–28 maya 2003 g.)* [Economy. Service. Tourism. Culture (ESTC-2003): Proc. V Int. Sci.-Pract. Conf. (Barnaul, May 27–28, 2003)]. Barnaul, Izd. Altai. Gos. Tekh. Univ., 2003, pp. 47–50. (In Russian)
15. Borisov A.S. Technological support system for paleomagnetic studies of bottom sediments in modern lakes. *Extended Abstract of Doct. Geol.-Mineral. Sci. Diss.* Kazan, 2004. 46 p. (In Russian)
16. Burov B.V., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. *Paleomagnitnyi analiz* [Paleomagnetic Analysis]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 1986. 167 p. (In Russian)
17. Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. Coercivity spectrometer. Utility Model Patent no. 81805. *FIPS Byull.*, no. 9, 2009. (In Russian)
18. Jasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov B.V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer. *Geol. Carpathica*, 1998. vol. 49, no. 3, pp. 224–225.
19. 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 paleo-environmental reconstruction. *ARN J. Earth Sci.*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 1–6.
20. Day R., Fuller M., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1977, vol. 13, no. 4, pp. 260–267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X).
21. Dunlop D.J. Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2002, vol. 107, no. B3, pp. EPM 4-1–EPM 4-22. <https://doi.org/10.1029/2001JB000486>.
22. Litvinova T.P., Timofeeva I.K., Kudryavtsev I.V. Report on the object “Advanced Geophysical Tools for State GeolMap-1000/3”. Book 17 (M-44). St. Petersburg, VSEGEI, RGF, 2012. (In Russian)
23. Glukhov M.S. Magnetic microspherules: Morphology, composition, and principles of classification. *Cand. Geol.-Mineral. Sci. Diss.* Kazan, 2022. 202 p. (In Russian)
24. Kuzina D.M. Cosmic matter in sediments and sedimentary rocks: Diagnostic methods and their use for solving geological problems. *Cand. Geol.-Mineral. Sci. Diss.* Kazan, 2019. 183 p. (In Russian)

25. Subetto D.A., Leont'ev P.A., Serykh L.S., Andronikov A.V., Nazarova L.B., Kublitskii U.A. Ab-rupt/catastrophic natural and climatic changes and phenomena at the boundary of the Late Neopleistocene and Holocene in Northwest Russia. *O-vo. Sreda. Razvit.*, 2016, no. 2, pp. 87–96. (In Russian)
26. Jelinowska A., Tucholka P., Wieckowski K. Magnetic properties of sediments in a Polish lake: Evidence of a relation between the rock-magnetic record and environmental changes in Late Pleistocene and Holocene sediments. *Geophys. J. Int.*, 1997, vol. 129, no. 3, pp. 727–736. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb04508.x>.

⟨ **Для цитирования:** Юсупова А.Р., Нурғалиева Н.Г., Кузина Д.М., Сотникова В.Ф., Муликова Д.И. Предварительные магнитно-минералогические исследования донных отложений озера Белое (Южная Сибирь, Россия) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 620–632. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.620-632>. ⟩

⟨ **For citation:** Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Kuzina D.M., Sotnikova V.F., Mulikova D.I. Preliminary magnetic mineralogical studies of Lake Beloe sediments (Southern Siberia, Russia). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 620–632. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.620-632>. (In Russian) ⟩

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.384

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.633-645

ОШИБКИ ОРИЕНТИРОВАНИЯ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАГНИТНОГО КОМПАСА И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ

И.Е. Лебедев, В.Э. Павлов, П.А. Минаев

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук,
г. Москва, 119234, Российская Федерация*

Аннотация

На примере палеомагнитного исследования вулканических пород Охотско-Чукотского вулканического пояса определены масштаб и характер распределения ошибок ориентации образцов, связанных с использованием магнитного компаса, а также влияние этих ошибок на точность определения средних направлений по сайтам и по региону в целом. Выполнена оценка влияния этих ошибок на положение итогового палеомагнитного полюса и на дисперсию виртуальных геомагнитных полюсов, используемую обычно как меру амплитуды палеомагнитных вариаций. Рассмотрены существующие альтернативные (т. е. не использующие магнитный компас) методы ориентировки палеомагнитных образцов, их преимущества и недостатки. Предложена новая методика ориентации палеомагнитных образцов, предполагающая использование теодолита, снабженного лазерным указателем. Эта методика свободна от некоторых критических недостатков ранее использовавшихся альтернативных методов.

Ключевые слова: солнечный компас, магнитный компас, ошибки ориентировки палеомагнитных образцов, альтернативные методы ориентировки.

1. Введение

В геологии и геофизике много областей, в которых необходимо определять ориентацию различных геологических объектов, образцов, текстур, трещин и др. Особое значение этот вопрос имеет для палеомагнитных исследований, где от точности ориентации палеомагнитных образцов непосредственно зависят безошибочность и надежность конечного результата.

В большинстве случаев для ориентации палеомагнитных образцов используют магнитный (горно-геологический) компас, однако при отборе сильномагнитных пород, образующих зачастую сильные локальные магнитные аномалии, замеры, выполненные магнитным компасом, могут давать искаженные результаты.

Масштабы этих искажений оцениваются различными исследователями от незначительных до совершенно неприемлемых (например, [1]). При этом в мировой литературе приводятся только единичные оценки, основанные на реальных экспериментальных результатах [1, 2]. Соответствующие публикации в отечественной литературе нам не известны.

В настоящей работе на примере исследования преимущественно базальтовых вулканических потоков Охотско-Чукотского вулканического пояса представлены данные, которые позволяют оценить величину ошибок ориентации палеомагнитных образцов, связанных с использованием магнитного компаса, показан характер их распределения, а также рассмотрен вопрос о влиянии этих ошибок на средние палеомагнитные направления, определенные в масштабах потоков (сайтов) и региона. Полученные результаты подчеркивают важность использования альтернативных методов ориентации палеомагнитных проб, отбираемых из сильномагнитных горных пород. В статье рассматриваются существующие альтернативные методы, их достоинства и недостатки и предлагается новый метод, лишенный, в какой-то степени, этих недостатков.

2. Объект исследований, отбор и ориентация образцов

Объект исследований расположен на территории Западной Чукотки в непосредственной близости от месторождения Купол. Опробованные породы участвуют в строении Охотско-Чукотского вулканического пояса – одной из крупнейших на планете окраинно-континентальных вулканогенных провинций. Для палеомагнитных исследований отбирали полого лежащие вулканические породы преимущественно среднего-основного состава: лавы базальтов, андезибазальтов и андезитов возрастом 88–84 млн лет [3]. Такие породы, как правило, сильномагнитны, поэтому при отборе применяли обычную процедуру контроля их влияния на стрелку магнитного компаса, состоявшую в визуальном контроле положения стрелки компаса при приближении последнего к месту отбора и при удалении от него. Геологическая позиция изученных разрезов, объединенных в обсуждаемый в данной работе объект «Купол», детально описана в наших предыдущих работах [3, 4].

Для проверки надежности ориентировок, измеренных магнитным компасом, в ходе полевых работ 2021 г. замеры ориентировок для всех образцов производили также альтернативными методами (по солнцу и при помощи теодолита (подробнее – в разделе 4.2)). Отбор производили по сайтовой методике, описанной в многочисленных классических работах, например, [5]. Всего из 79 сайтов были отобраны 1 024 индивидуальных образца (по 10–15 образцов из каждого сайта).

В замеры, выполненные магнитным компасом, вносили поправки за склонение (-4.2°), которые определяли по 13-й модели IGRF [6].

Лабораторные палеомагнитные исследования проводили в лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма ИФЗ РАН на оборудовании ЦКП «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» [7] по классической методике [5]. При расчете разброса виртуальных геомагнитных полюсов S_b учитывали группирование вулканических потоков по вулканическим пульсам [8]. Вслед за [9] расчеты S_b приводили с разными критериями отбраковки данных: угол среза (cutoff) определяли либо по итеративной процедуре Вандамма [10], либо принимали равным 45° ; данные по сайтам отбрасывали, если их кучность (K) составляла менее 50 или 100.

3. Величина и характер распределения ошибок ориентации, связанных с использованием магнитного компаса

3.1. Ошибка по склонению. При прямом сравнении азимутов падения площадок, используемых для ориентации образцов, измеренных магнитным компасом и альтернативными методами, только для половины образцов отклонение составляет менее 6° (59% образцов), причем в интервал $\pm 2^\circ$ попадает всего 23% образцов (рис. 1). 24% образцов отклоняется от истинного в пределах от 6° до 10° и еще 7% – в пределах от 10° до 18° . Для оставшихся 10% образцов ошибка определения азимута составляет более чем 18° .

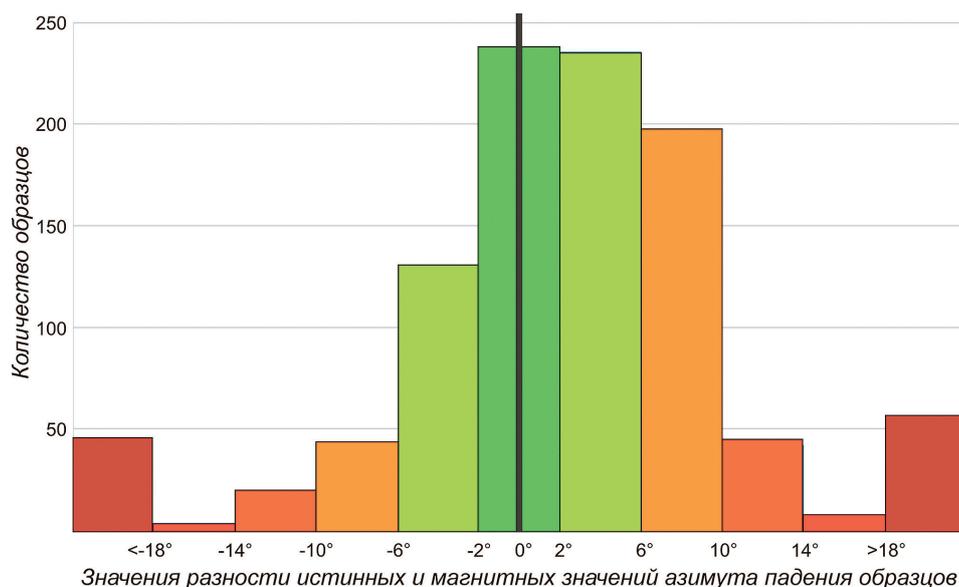


Рис. 1. Гистограмма разности истинных значений азимута, полученных магнитным компасом и альтернативными методами. Цвет на гистограмме отображает величину отклонения данных (зеленый – минимальное, оранжевый – среднее, красный – максимальное)

Полученное распределение отклонений магнитных значений азимута от альтернативных методов имеет среднее значение равно -1.1° и стандартное отклонение $\sigma = 17.2^\circ$. Довольно большое значение стандартного отклонения обусловлено наличием некоторого числа образцов (5–6% от всей коллекции), ориентировки которых определены с очень большой (несколько десятков градусов) ошибкой. Если отбросить такие образцы, стандартное отклонение существенно уменьшается до величин $6-8^\circ$ и меньше.

Можно предположить, что ошибка определения азимута магнитным компасом внутри сайта носит случайный характер. Если это так, то ошибки внутри сайта должны усредняться и средние по сайтам значения азимута не должны сильно отличаться от истинных (т. е. определенных альтернативными методами). Однако, это не так. Полученные данные показывают, что средние склонения по сайтам, определенные магнитным компасом, заметно отличаются от истинных. Для 67% сайтов эта ошибка лежит внутри интервала $\pm 6^\circ$, при этом в интервал $\pm 2^\circ$ попадает только 22% образцов. Для 24% образцов отклонения составляют $6-10^\circ$, азимуты оставшихся 9% образцов отклоняются бо-

лее чем на 10° . Среднее арифметическое теперь составляет 0.3° , а стандартное отклонение $\sigma = 13.8^\circ$.

3.2. Ошибка по направлениям и ошибка определения палеомагнитного полюса. Ошибка в определении азимута падения при ориентировке образца отражается только на его палеомагнитном склонении. В случае высоких наклонений ошибка определения склонения с увеличением наклонения все меньше влияет на точность определения палеомагнитного направления. Благодаря работам [4, 11] известно, что рассматриваемые породы формировались на очень высоких широтах, следовательно, можно ожидать, что ошибки определения азимута не будут существенно сказываться на средних направлениях как на уровне сайтов, так и на уровне региона.

На рис. 2 показано распределение угловых расстояний между средними по сайтам, определенными с использованием магнитного компаса и с помощью альтернативных методов. Как мы и предполагали, ошибки определения палеомагнитных направлений на уровне средних направлений по сайтам не так драматичны, как в случае палеомагнитных склонений.

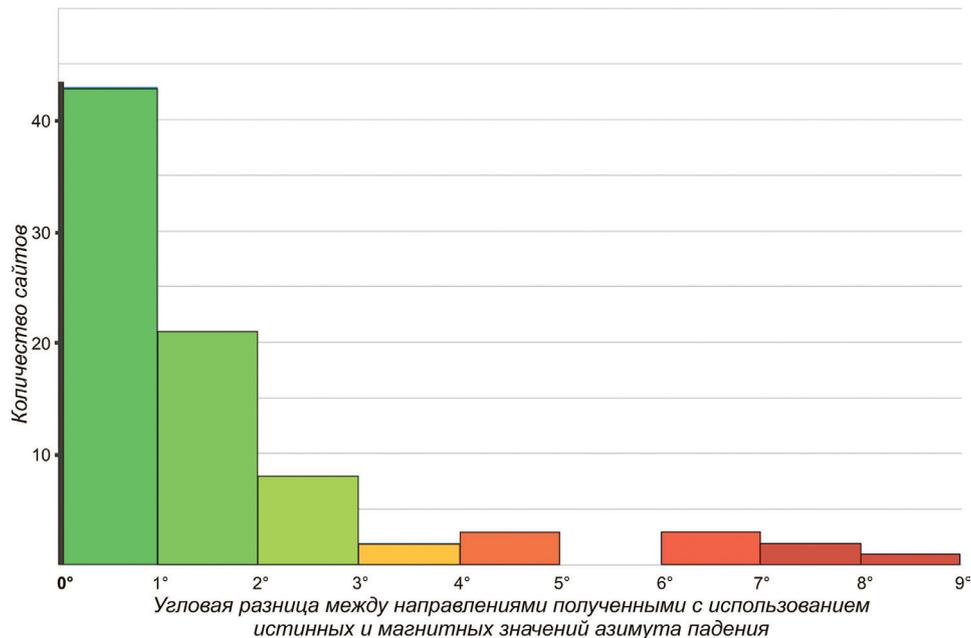


Рис. 2. Гистограмма угловых расстояний между средними направлениями по сайтам, рассчитанными с использованием склонений по магнитному компасу (с поправкой IGRF) и альтернативными методами. Цвет на гистограмме отображает величину угловой разницы (зеленый – минимальная, оранжевый – средняя, красный – максимальная)

Для 87% сайтов эти ошибки не превышают 3° , причем для половины всех сайтов они меньше 1° . Кучности средних направлений по сайтам и радиусы соответствующих кругов доверия (α_{95}), определенные по данным измерений магнитным компасом и альтернативными методами, оказались практически идентичными: $K = 160$, $K = 162$ и $\alpha_{95} = 4.6^\circ$, 4.7° . Получив подобные результаты, мы, практически, не ожидали сильного отклонения в среднем направлении по всему объекту, которое в итоге составило менее половины градуса. Эта разница, после

пересчета в палеомагнитный полюс, на фоне ошибки его определения около 5° , естественно, является ничтожно малой и не влияет на конечный результат.

3.3. Ошибка дисперсии амплитуды вековых вариаций. Различия значений параметра Sb (амплитуды палеовековых вариаций геомагнитного поля), рассчитанных по данным, полученным с помощью магнитного компаса и по результатам альтернативных методов ориентировки образцов, оказались в пределах ошибки определения (табл. 1). Максимальная разница в значениях наблюдается при наиболее строгих параметрах сортировки данных – при использовании только сайтов с кучностью более 100 и с учетом группирования потоков по вулканическим пульсам.

Табл. 1.

Сравнение величины амплитуды вековых вариаций (Sb)

Угол среза, по Вандамму [10]						
	N альт./маг.	n альт./маг.	Sb альт. – Sb маг.	$Sb-$ альт./маг.	$Sb+$ альт./маг.	Угол среза
<i>с группированием вулканических пульсов</i>						
все	62/60	61/59	–0.2	–2.1/–2.3	2.3/2.1	42.3
$K > 50$	59/57	58/57	–0.5	–2/–2.8	2/2	41.9
$K > 100$	43/42	43/42	–1.7	–2.3/–2.8	2.4/2.8	43
<i>без группирования вулканических пульсов</i>						
все	79/79	78/78	0.1	–2/–2	1.8/2	40.2
$K > 50$	74/73	73/72	0	–1.9/–1.9	2/2.1	39.8
$K > 100$	57/57	57/56	–0.5	–2.3/–2.3	2.1/2.2	40.7
Фиксированный угол среза 45°						
<i>с группированием вулканических пульсов</i>						
все	62/60	62/60	–0.2	–2.3/–2.6	2.1/2.4	45
$K > 50$	59/57	59/57	–0.5	–2.3/–2.4	2.2/2.4	45
$K > 100$	43/42	43/42	–1.7	–2.5/–3	2.5/2.7	45
<i>без группирования вулканических пульсов</i>						
все	79/79	79/79	0.1	–2/–2.1	2.3/2.2	45
$K > 50$	74/73	74/73	0	–2.2/–2.4	2/2.1	45
$K > 100$	57/57	57/57	–1.2	–2.3/–2.6	2.1/2.4	45

Примечание: N альт./маг. – всего сайтов использованных для расчета после применения фильтров по величине кучности с использованием ориентировки альтернативными методами/магнитным компасом; n альт./маг. – количество сайтов после применения угла отсечения (cutoff) по альтернативным/магнитным данным; Sb альт. – Sb маг. – разность между значениями величины амплитуды вековых вариаций (Sb) рассчитанных по альтернативным/магнитным данным; $Sb-$ альт./маг. и $Sb+$ альт./маг. – нижняя и верхняя границы доверительных интервалов полученных по альтернативным/магнитным данным

Таким образом, представленные данные по Чукотке показывают, что даже значительная ошибка в определении азимутов падения образцов не приводит к значимому отклонению итогового результата, т. е. практически не искажает ни координаты среднего палеомагнитного полюса, ни значения амплитуды палео-

ковых вариаций. Мы полагаем, что этот результат может быть объяснен высокими палеонаклонениями (около 80°), свойственными данному конкретному объекту, а также весьма значительной статистикой (относительно большим числом изученных сайтов), позволившей существенно усреднить ошибки определения средних палеомагнитных направлений по сайтам.

Поскольку подобные основные породы могут формироваться и на более низких широтах, влияние ошибки определения склонения на конечное направление может быть значительно более сильным, чем в рассмотренном нами примере. Поэтому в общем случае при отборе сильномагнитных пород желательнее использовать альтернативных методов ориентировки образцов. Существующим вариантам методик альтернативного ориентирования образцов посвящен следующий раздел.

4. Обзор альтернативных методов ориентировки образцов

4.1. Существующие методы. Во избежание проблем, связанных с использованием магнитного компаса, широко используется методика ориентировки палеомагнитных образцов по солнцу [5]. Она позволяет рассчитать истинный азимут падения по углу тени от солнца, траектория движения которого известна в любой момент времени для любой точки земного шара. Методика предполагает измерение солнечной тени от гномона (вертикального тонкого стержня, установленного по центру лимба) на лимбе компаса. Полученный замер, наряду с известными координатами и временем отбора, позволяет с высокой точностью ориентировать палеомагнитные образцы.

Относительная простота, достаточность наличия из дополнительного оборудования только гномона и высокая точность делают этот метод наиболее популярным. Однако методика, очевидно, требует наличия ясной погоды во время измерения ориентировки образца, что накладывает заметные ограничения на возможности ее применения.

Для преодоления этих проблем были разработаны другие методики, в частности техника обратного визирования (back-sighting), визирование образца на отдаленный объект и техника с использованием высокоточного GPS позиционирования [2, 5, 12]. Рассмотрим кратко каждую из этих методик.

Техника обратного визирования основана на проверке измерений компаса на ориенторе вторым компасом, расположенным на удалении от отбираемого обнажения. Она подразумевает выставление параллельно обоим компасов по визирам и сравнение полученных результатов измерений. При очевидной простоте недостатками метода являются невысокая точность ($\sim 5^\circ$ по [5]) и учет влияния только локальных аномалий, связанных исключительно с конкретным обнажением. Визирование на отдаленную точку подразумевает отсчет угла между направлением на образец и направлением на хорошо обозримую точку с известными координатами. Как и в случае обратного визирования, метод прост, но у него есть некоторые недостатки. Первый – это частое отсутствие хорошо видимой, отдаленной и однозначно определяемой опорной точки. И второй, наиболее важный, – это неудобство визирования на объект в случае отбора из субвертикального обнажения.

Наиболее современные методики ориентирования палеомагнитных образцов подразумевают использование GPS позиционирования. Одна из таких ме-

тодик требует наличия весьма сложного специального устройства [1, 12]. Оно представляет собой прямолинейную штангу длиной 1 м (базовая линия), на концах которой установлены высокоточные приемники GPS, которые по разнице координат позволяют определить ориентировку этой линии. На базовом основании (штанге) установлен лазер, который направляется на отражающую призму, установленную на ориентирующем устройстве. По отражению от этой призмы отсчитывается угол между известной базовой линией и азимутом падения образца. Имея эти данные, можно рассчитать истинный азимут с достаточно высокой точностью. Однако у этой методики имеются также некоторые недостатки: помимо весьма высокой цены высокоточных GPS приемников и хрупкости такого ориентирующего устройства (особенно в полевых условиях), она требует заметного времени на стабилизацию ориентировки базовой линии (до получаса) и, соответственно, на измерение ориентировки самих образцов.

Другой вариант подобной методики представлен в работе [2]. В этом случае используется стандартный корабельный GPS компас, смонтированный на устройство, ориентирующее образцы. GPS компас включает в себя пару высокоточных спутниковых приемников в компактном корпусе. Ориентировка устройства происходит по разности полученных координат. Главное преимущество данной модификации в относительной легкости GPS компаса, который весит около килограмма. Однако, как отмечают сами авторы [2], устройство имеет не всегда приемлемую точность. Так, если на открытой местности полученные значения оказались неотличимы от солнечных измерений, то в лесу или в условиях городской местности точность оказалась неудовлетворительной. Еще одним недостатком, на наш взгляд, представляется длительность каждого измерения – около 5 мин [2] на каждый образец, что существенно замедляет работу в полевых условиях.

Отметим, что высокоточные GPS приемники, необходимые для реализации вышеописанных методик, весьма энергозависимы и требуют наличия источника электричества, что не всегда легко обеспечить в отдаленных уголках нашей страны.

Большие проблемы возникают при отборе ориентированных образцов при работе в подземных горных выработках, где использование магнитного компаса затруднено наличием большого количества магнитного оборудования (крепи, механизмы, электрические коммуникации и др.), а применение солнечного компаса невозможно. Для этого случая сотрудниками Палеомагнитной лаборатории ИФЗ РАН был разработан метод, в котором ориентировку образца определяли с опорой на известные маркшейдерские метки [13].

4.2. Ориентировка палеомагнитных образцов с помощью теодолита с лазером. Чтобы не зависеть от погодных условий (наличия солнца) или весьма сложных, хрупких и дорогостоящих устройств (высокоточный GPS), нами была разработана новая методика ориентации палеомагнитных образцов при помощи теодолита с вмонтированным в него лазером. Базовые принципы данной методики схожи с техникой с использованием GPS [2, 12] или маркшейдерских меток [13]. Для ее использования необходим обыкновенный теодолит, который позволяет отсчитывать углы в горизонтальной плоскости, и лазер, направление луча которого совпадает с направлением оси окуляра теодолита (рис. 3). Простота и дешевизна подобной конструкции является ее определенным преимуществом.

Также нельзя не отметить относительную экспрессность метода: необходимо потратить лишь 5–10 мин на установку самого теодолита, после чего замеры производятся с той же производительностью, что при использовании солнечного компаса. Основными недостатками методики являются тяжеловесность конструкции (стандартная тренога с теодолитом весят около 12 кг) и необходимость наличия прямой видимости в любом направлении хотя бы на 500 м (подробнее – в следующем абзаце).

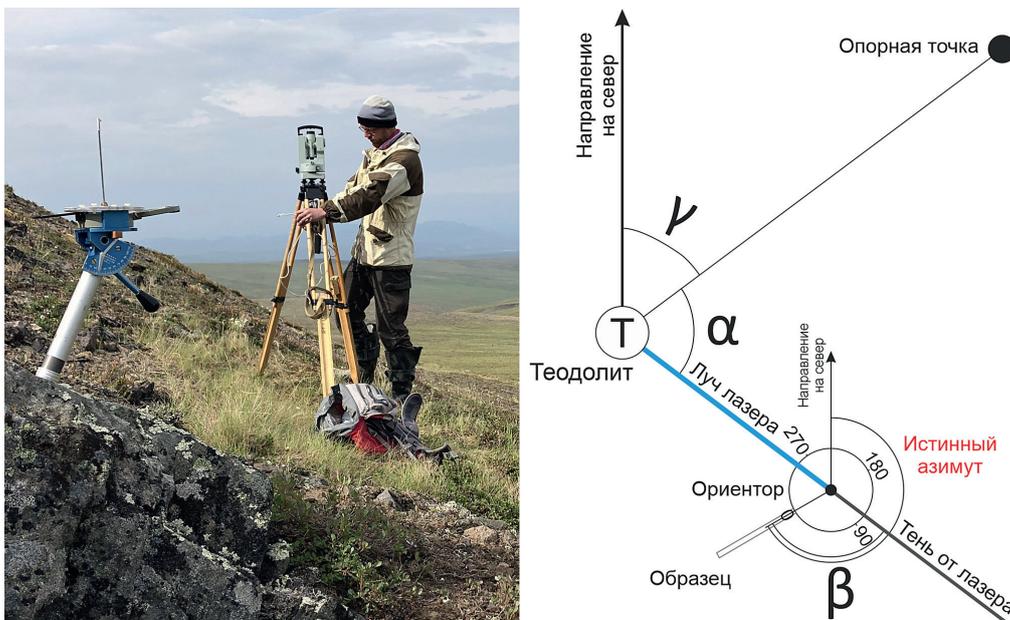


Рис. 3. Слева – фотография теодолита с лазером и стандартного ориентора. Справа – схема отбора керна (образца) при помощи теодолита с лазером и специального ориентирующего устройства (ориентора)

Согласно предлагаемой методике для расчета истинного азимута (ИА) падения площадки, по которой ориентируется образец (или падения керна), необходимо определить три угла (рис. 3). Первый угол – гамма (γ) – является азимутом от теодолита на какую-либо опорную точку. Данный угол определяется по разности координат между известными координатами теодолита и опорной точки. Эти координаты могут определяться в поле стандартным GPS приемником. Точность определения угла гамма (γ) непосредственно зависит от точности определения координат теодолита и опорной точки, а также от удаленности опорной точки от теодолита. Наиболее подходящие опорные точки – это триангуляционные пункты, базовый лагерь и т. п. Однако в случае отсутствия таковых, для достижения точности порядка 1° достаточно установить вешку, на которую будет производиться визирование, в опорной точке, расположенной на расстоянии около 500 м от теодолита. Второй угол, необходимый для расчета истинного азимута падения керна, – альфа (α) – измеряется теодолитом между направлением на опорную точку и центром стандартного ориентирующего устройства (направлением на гномон). Третий угол – бета (β) – это угол тени, создаваемой лазером на лимбе ориентирующего устройства от гномона.

При наличии всех выше указанных углов расчет ИА для каждого образца сводится к достаточно простой геометрической задаче, решение которой описывается формулами 1–3:

$$\text{Если, то } \alpha + \gamma + \beta < 360, \text{ то ИА} = \alpha + \gamma + \beta; \quad (1)$$

$$\text{Если, то } 360 < \alpha + \gamma + \beta < 720, \text{ то ИА} = \alpha + \gamma + \beta - 360; \quad (2)$$

$$\text{Если, то } \alpha + \gamma + \beta > 720, \text{ то ИА} = \alpha + \gamma + \beta - 720; \quad (3)$$

Для проверки новой методики 107 образцов было ориентировано одновременно по вышеописанной методике и при помощи солнечного компаса. Разность измерений по солнцу и при помощи теодолита в пределах $\pm 3^\circ$ оказалась у 85% измерений, а в пределах $\pm 5^\circ$ еще у 11%. На большую разность приходится всего 4% измерений, которые скорее всего связаны со всевозможными ошибками первичных данных, полученных в полевых условиях. Среднее значение отклонения замеров, сделанных солнечным компасом и теодолитом, составляет при этом 0.3° , при стандартной ошибке 2.3° . Это сравнение указывает на высокую сходимость результатов измерений двумя методами, что позволяет использовать в дальнейшем ориентировку с помощью теодолита с лазером как альтернативу солнечному компасу.

Заключение

Проведенные исследования подтверждают существующее мнение и отдельные имеющиеся данные о том, что использование магнитного компаса при палеомагнитном опробовании сильномагнитных пород может привести к существенным ошибкам ориентировки образцов. На примере исследования вулканических пород Охотско-Чукотского вулканического пояса определен масштаб этих ошибок, характер их распределения, а также влияние на средние палеомагнитные направления, осредненные по сайтам и по региону. Рассмотрены альтернативные методы ориентировки палеомагнитных образцов, предложен новый метод, частично лишенный недостатков ранее использовавшихся альтернативных методов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 23-17-000112, <https://rscf.ru/project/23-17-00112/>.

Литература

1. *Cromwell G., Tauxe L., Staudigel H., Constable C.G., Koppers A.A.P., Pedersen R.-B.* In search of long-term hemispheric asymmetry in the geomagnetic field: Results from high northern latitudes // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2013. V. 14, No 8. P. 3234–3249. <https://doi.org/10.1002/ggge.20174>.
2. *Fukuma K., Muramatsu T.* Orienting paleomagnetic drill cores using a portable GPS compass // *Earth, Planets Space.* 2022. V. 74, No 1. Art. 136. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01699-y>.
3. *Тихомиров П.Л., Лебедев И.Е., Люилье Ф., Павлов В.Э.* Стратиграфия комплексов Охотско-Чукотского пояса в верховьях р. Малый Анюй (район месторождения Купол): данные U–Pb- и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.* 2021. Т. 501, № 2. С. 192–198. <https://doi.org/10.31857/S2686739721120148>.
4. *Лебедев И.Е., Бобровникова Е.М., Тихомиров П.Л., Эйд Б., Люилье Ф., Павлов В.Э.* Амплитуда вековых геомагнитных вариаций в позднем мелу по результатам пале-

- омагнитных исследований вулканитов Охотско-Чукотского пояса верхнего течения реки малый Анюй (западная Чукотка) // *Физика Земли*. 2022. № 2. С. 41–59. <https://doi.org/10.31857/S0002333722020041>.
5. *Tauxe L.* Essentials of Paleomagnetism. Berkeley: Univ. of Calif. Press, 2010. xvi, 489 p. <https://doi.org/10.1525/9780520946378>.
 6. *Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coïsson P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lalanne X., Langlais B., Léger J.-M., Lesur V., Lowes F.J., Macmillan S., Mandea M., Manoj C., Maus S., Olsen N., Petrov V., Ridley V., Rother M., Sabaka T.J., Saturnino D., Schachtschneider R., Sirol O., Tangborn A., Thomson A., Toffner-Clausen L., Vigneron P., Wardinski I., Zvereva T.* International Geomagnetic Reference Field: The 12th generation // *Earth, Planets Space*. 2015. V. 67, No 1. Art. 79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>.
 7. *Веселовский П.В., Дубиня Н.В., Пономарев А.В., Фокин И.В., Патонин А.В., Пасенко А.М., Фетисова А.М., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А., Рудько Д.В., Чистякова А.В.* Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» // *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. Т. 13, № 2. Ст. 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>.
 8. *Chenet A.-L., Fluteau F., Courtillot V., Gérard M., Subbarao K.V.* Determination of rapid Deccan eruptions across the Cretaceous-Tertiary boundary using paleomagnetic secular variation: Results from a 1200-m-thick section in the Mahabaleshwar escarpment // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2008. V. 113, No B4. Art. B04101. <https://doi.org/10.1029/2006JB004635>.
 9. *Dobrovine P.V., Veikkolainen T., Pesonen L.J., Piispa E., Ots S., Smirnov A.V., Kulakov E.V., Biggin A.J.* Latitude dependence of geomagnetic paleosecular variation and its relation to the frequency of magnetic reversals: Observations from the Cretaceous and Jurassic // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2019. V. 20, No 3. P. 1240–1279. <https://doi.org/10.1029/2018GC007863>.
 10. *Vandamme D.* A new method to determine paleosecular variation // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1994. V. 85, No 1–2. P. 131–142. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(94\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)90012-4).
 11. *Stone D.B., Layer P.W., Raikevich M.I.* Age and paleomagnetism of the Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt (OCVB) near Lake El'gygytgyn, Chukotka, Russia // *Stephan Mueller Spec. Publ. Ser.* 2009. V. 4. P. 243–260. <https://doi.org/10.5194/smsps-4-243-2009>.
 12. *Lawrence K.P., Tauxe L., Staudigel H., Constable C.G., Koppers A., McIntosh W., Johnson C.L.* Paleomagnetic field properties at high southern latitude // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2009. V. 10, No 1. Art. Q01005. <https://doi.org/10.1029/2008GC002072>.
 13. *Latyshev A.V., Rad'ko V.A., Veselovskiy R.V., Fetisova A.M., Pavlov V.E.* Correlation of the Permian-Triassic ore-bearing intrusions of the Norilsk Region with the volcanic sequence of the Siberian Traps based on the paleomagnetic data // *Econ. Geol.* 2020. V. 115, No 6. P. 1173–1193. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4746>.

Поступила в редакцию 10.10.2023

Принята к публикации 15.11.2023

Лебедев Иван Евгеньевич, научный сотрудник лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, г. Москва, 123242, Россия

E-mail: lebedev232@ya.ru

Павлов Владимир Эммануилович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, г. Москва, 123242, Россия

E-mail: pavlov.ifz@gmail.com

Минаев Павел Александрович, главный инженер лаборатории Главного геомагнитного поля и петромагнетизма,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, г. Москва, 123242, Россия

E-mail: ps1100@yandex.ru

ISSN 2542-064X (Print)

ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2023, vol. 165, no. 4, pp. 633–645

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.633-645

Orientation Errors of Paleomagnetic Samples When Using a Magnetic Compass and Possible Ways to Overcome Them

*I.E. Lebedev**, *V.E. Pavlov***, *P.A. Minaev****

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
Moscow, 123242 Russia*

E-mail: *lebedev232@ya.ru, **pavlov.ifz@gmail.com, ***ps1100@yandex.ru

Received October 10, 2023; Accepted November 15, 2023

Abstract

A paleomagnetic study of volcanic rocks of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt was performed to identify the scale and distribution pattern of orientation errors associated with the use of a magnetic compass, as well as to find how they influence the accuracy of calculated mean directions at both site and regional levels. The impact of these errors on the position of the final paleomagnetic pole and the dispersion of virtual geomagnetic poles, which is a common measure of the amplitude of paleosecular geomagnetic variations, was assessed. The alternative (non-magnetic compass) methods for orienting paleomagnetic samples were analyzed. Their advantages and disadvantages were outlined. A new method for orienting paleomagnetic samples using a theodolite equipped with a laser pointer was proposed. This method has a distinct advantage over previous alternatives as it is not limited by certain critical factors.

Keywords: solar compass, magnetic compass, orientation errors of paleomagnetic samples, alternative orientation methods

Acknowledgements. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-17-000112, <https://rscf.ru/project/23-17-00112/>).

Figure Captions

Fig. 1. Histogram of the difference between the true azimuth values obtained with the use of a magnetic compass and by alternative methods. Deviation of the data is shown in color (green – minimum, orange – mean, red – maximum).

Fig. 2. Histogram of the angular distances between the mean directions of the studied sites calculated using magnetic declinations (with IGRF correction) and alternative methods. The degree of the angular difference is shown in color (green – minimum, orange – average, red – maximum).

Fig. 3. Theodolite with a laser pointer and a standard orienting fixture (on the left). Core (sample) collection using a theodolite equipped with laser and an orienter (on the right).

References

1. Cromwell G., Tauxe L., Staudigel H., Constable C.G., Koppers A.A.P., Pedersen R.-B. In search of long-term hemispheric asymmetry in the geomagnetic field: Results from high northern latitudes. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 2013, vol. 14, no. 8, pp. 3234–3249. <https://doi.org/10.1002/ggge.20174>.
2. Fukuma K., Muramatsu T. Orienting paleomagnetic drill cores using a portable GPS compass. *Earth, Planets Space*, 2022, vol. 74, no. 1, art. 136. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01699-y>.
3. Tikhomirov P.L., Lebedev I.E., Lhuillier, F.J.L., Pavlov V.E. Stratigraphy of the Okhotsk–Chukotka belt in the headwaters of the Malyi Anyui River (the vicinity of Kupol deposit): U–Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age data. *Dokl. Earth Sci.*, 2021, vol. 501, pt. 2, pp. 1059–1064. <https://doi.org/10.1134/S1028334X2112014X>.
4. Lebedev I.E., Bobrovnikova E.M., Tikhomirov P.L., Eid B., Lhuillier F., Pavlov V.E. Amplitude of secular geomagnetic variation in Late Cretaceous based on paleomagnetic studies of the Okhotsk–Chukotka volcanic belt from upper reaches of Malyi Anyui River, West Chukotka. *Izv. Phys. Solid Earth*, 2022, vol. 58, no. 2, pp. 185–202. <https://doi.org/10.1134/S1069351322020045>.
5. Tauxe L. *Essentials of Paleomagnetism*. Berkeley, Univ. of Calif. Press, 2010. xvi, 489 p. <https://doi.org/10.1525/9780520946378>.
6. Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T., Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coisson P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lalanne X., Langlais B., Léger J.-M., Lesur V., Lowes F.J., Macmillan S., Mandaia M., Manoj C., Maus S., Olsen N., Petrov V., Ridley V., Rother M., Sabaka T.J., Saturnino D., Schachtschneider R., Sirolo O., Tangborn A., Thomson A., T  ffner-Clausen L., Vigneron P., Wardinski I., Zvereva T. International Geomagnetic Reference Field: The 12th generation. *Earth, Planets Space*, 2015, vol. 67, no. 1, art. 79. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9>.
7. Veselovskiy R.V., Dubinya N.V., Ponomarev A.V., Fokin I.V., Patonin A.V., Pasenko A.M., Fetisova A.M., Matveev M.A., Afinogenova N.A., Rud’ko D.V., Chistyakova A.V. Shared Research Facilities “Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism” of the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. *Geodin. Tektonofiz.*, 2022, vol. 13, no. 2, art. 0579. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0579>. (In Russian)
8. Chenet A.-L., Fluteau F., Courtillot V., Gérard M., Subbarao K.V. Determination of rapid Deccan eruptions across the Cretaceous-Tertiary boundary using paleomagnetic secular variation: Results from a 1200-m-thick section in the Mahabaleshwar escarpment. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2008, vol. 113, no. B4, art. B04101. <https://doi.org/10.1029/2006JB004635>.
9. Doubrovine P.V., Veikkolainen T., Pesonen L.J., Piispa E., Ots S., Smirnov A.V., Kulakov E.V., Biggin A.J. Latitude dependence of geomagnetic paleosecular variation and its relation to the frequency of magnetic reversals: Observations from the Cretaceous and Jurassic. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 2019, vol. 20, no. 3, pp. 1240–1279. <https://doi.org/10.1029/2018GC007863>.
10. Vandamme D. A new method to determine paleosecular variation. *Phys. Earth Planet. Inter.* 1994, vol. 85, nos. 1–2, pp. 131–142. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(94\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)90012-4).
11. Stone D.B., Layer P.W., Raikevich M.I. Age and paleomagnetism of the Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt (OCVB) near Lake El’gygytgyn, Chukotka, Russia. *Stephan Mueller Spec. Publ. Ser.*, 2009, vol. 4, pp. 243–260. <https://doi.org/10.5194/smsps-4-243-2009>.

12. Lawrence K.P., Tauxe L., Staudigel H., Constable C.G., Koppers A., McIntosh W., Johnson C.L. Paleomagnetic field properties at high southern latitude. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 2009, vol. 10, no. 1, art. Q01005. <https://doi.org/10.1029/2008GC002072>.
13. Latyshev A.V., Rad'ko V.A., Veselovskiy R.V., Fetisova A.M., Pavlov V.E. Correlation of the Permian-Triassic ore-bearing intrusions of the Norilsk Region with the volcanic sequence of the Siberian Traps based on the paleomagnetic data. *Econ. Geol.*, 2020, vol. 115, no. 6, pp. 1173–1193. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4746>.

Для цитирования: Лебедев И.Е., Павлов В.Э., Минаев П.А. Ошибки ориентирования палеомагнитных образцов при использовании магнитного компаса и возможные пути их преодоления // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 633–645. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.633-645>.

For citation: Lebedev I.E., Pavlov V.E., Minaev P.A. Orientation errors of paleomagnetic samples when using a magnetic compass and possible ways to overcome them. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 633–645. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.633-645>. (In Russian)

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 551.89+(268.55)

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.646-663

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВКЛЮЧАЯ ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ, КОЛОНОК ДОННЫХ ОСАДКОВ ИЗ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

*Д.В. Элькина^{1,2}, Е.А. Гусев¹, Д.В. Рябчук², А.Ю. Сергеев²,
Н.А. Костромина^{1,3}, Е.С. Новихина¹, А.А. Гостенина³,
Я.Д. Яржембовский¹, А.Л. Пискарев^{1,3}, А.А. Крылов¹,
Г.И. Ованесян¹, В.А. Жамойда²*

¹ФГБУ «ВНИИОкеангеология», г. Санкт-Петербург, 190121, Россия

²ФГБУ «ВСЕГЕИ», г. Санкт-Петербург, 199106, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург, 199034, Россия

Аннотация

Донные отложения арктических морей России изучены с разной степенью детальности. Наименее изучено Восточно-Сибирское море, в четвертичной геологии которого остаются значительные пробелы. В статье приводятся комплексные результаты исследований, включающие впервые полученные результаты палеомагнитных измерений для 9 колонок донных отложений, отобранных в Восточно-Сибирском море в ходе трех рейсов в рамках «Программы государственного геологического картографирования территории и континентального шельфа Российской Федерации масштаба 1:1 000 000». Результаты показали, насколько разнообразны процессы и условия осадконакопления в различных частях моря.

Ключевые слова: Восточно-Сибирское море, донные осадки, голоцен-четвертичные отложения, арктический шельф, палеомагнитные исследования, палинологический анализ, микрофаунистический анализ.

Введение

Донные осадки арктических морей изучены с разной степенью детальности. Комплексно исследованы четвертичные отложения Чукотского, Лаптевых, Баренцева и Карского морей. Значительно хуже обстоит дело с Восточно-Сибирским морем, что связано прежде всего с его значительной ледовитостью, удаленностью и труднодоступностью. Тем не менее в последние годы в различных экспедициях отобраны длинные и короткие колонки донных отложений Восточно-Сибирского моря, которые требуют стратиграфической интерпретации.

В Восточно-Сибирском море по сейсмоакустическим данным [1–4] выделяются области распространения голоценовых морских осадков и места выхода на поверхность более древних образований. Обширные выходы доголоценовых отложений на поверхность дна отмечены в северной части шельфа Восточно-Сибирского моря, где обнажаются темно-серые переуплотненные глины, содержащие фауну фораминифер и остракод, редкие раковинки моллюсков *Portlandia arctica* [Gray, 1824] (стан-

ция AF-0729, 76° 36' 13.8" с. ш., 161° 42' 4.3" в. д., глубина моря – 192 м). Определение возраста осадков по уран-иониевому методу привело к выводу о среднеплейстоценовом возрасте (181 тыс. лет) переуплотненных глин на глубине 52 см [5].

В других ранее изученных колонках с шельфа Восточно-Сибирского моря радиоуглеродным методом получены позднеплейстоцен-голоценовые датировки [4, 6]. Однако при получении значений, превышающих пределы датирования радиоуглеродного метода, появляется необходимость геохронологической привязки вскрытых отложений другими методами и, в частности, палеомагнитным [7, 8]. Именно применение палеомагнитного метода по колонкам скважин в Чукотском море [9] позволило определить эоплейстоцен-позднеплиоценовый возраст вскрытых отложений.

Целью данного исследования является расчленение верхней части осадочного разреза Восточно-Сибирского моря по 9 колонкам донных осадков, отобранным в разных частях бассейна, при использовании комплекса стратиграфических методов, а также предварительная возрастная интерпретация разреза.

1. Материалы и методы

1.1. Станции опробования. В Восточно-Сибирском море в рамках «Программы государственного геологического картографирования территории и континентального шельфа Российской Федерации масштаба 1:1 000 000» ФГБУ «ВНИИОкеангеология» в 2020 г. на НЭС «Михаил Сомов» (листы S-57, S-58) [10] и ФГБУ «ВСЕГЕИ» в 2018 и 2020 гг. (листы R-57-60, S-55, S-56) [3] с судов «Иван Киреев» (2018 г.) и «Капитан Воронин» (2020 г.) соответственно проводили отбор колонок донных осадков при помощи гравитационных трубок (рис. 1). В табл. 1 приведены характеристики станций отбора колонок и длина последних.

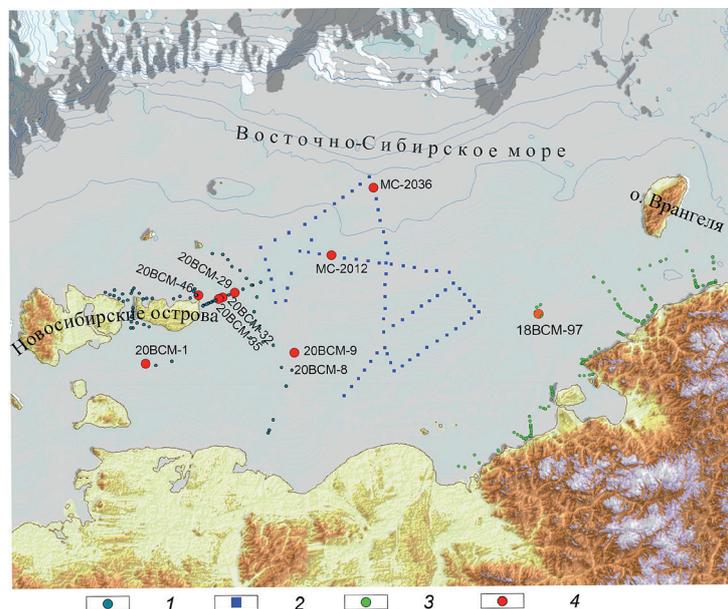


Рис. 1. Станции отбора колонок в ходе экспедиций 2018–2020 гг. в Восточно-Сибирском море: 1 – экспедиция 2020 г., ФГБУ «ВСЕГЕИ»; 2 – экспедиция 2020 г., ФГБУ «ВНИИОкеангеология»; 3 – экспедиция 2018 г., ФГБУ «ВСЕГЕИ»; 4 – колонки, по которым были проведены палеомагнитные исследования

Табл. 1

Станции отбора колонок донных осадков

Номер станции	Координаты, °	Глубина моря, м	Длина колонки, см
18ВСМ-97т	71.4145 с. ш., 170.3817 в. д.	48.7	176
20ВСМ-1т	74.2784 с. ш., 145.7165 в. д.	18	24
20ВСМ-9т	73.4349 с. ш., 155.785 в. д.	33	180
20ВСМ-29т	75.006858 с. ш., 153.2726 в. д.	17	37
20ВСМ-32т	75.008 с. ш., 152.7472 в. д.	14	50
20ВСМ-35т	75.0083 с. ш., 152.4034 в. д.	18	21
20ВСМ-46т	75.235265 с. ш., 151.118786 в. д.	20	22.5
МС-2012т	74.7673 с. ш., 161.5283 в. д.	37	171
МС-2036т	75.4006 с. ш., 167.1155 в. д.	65	119

1.2. Палеомагнитные измерения. Отбор образцов на палеомагнитные исследования производили сплошным образом для всех 9 колонок (см. табл. 1). Для этого использовали пластмассовые кубики с размерами граней 19×19×20 мм и внутренним объемом около 8 см³ для колонок 18-ВСМ-97т, 20ВСМ-1т, 20ВСМ-9т, 20ВСМ-29т, 20ВСМ-32т, 20ВСМ-35т, 20ВСМ-32т, 20ВСМ-35т. Из колонок МС-2012т и МС-2036т пробоотбор осуществляли при помощи стеклянных цилиндров диаметром от 2.1 до 2.5 см и высотой от 2 до 2.3 см, используя методику, описанную В.В. Кочегурой [7].

Палеомагнитные измерения проводили с использованием оборудования ресурсного центра «Геомодель» Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета. Измерения естественной остаточной намагниченности (ЕОН) выполнялись на СКВИД-магнитометре SRM-755 (2G Enterprises, США). В ходе процедуры ступенчатое размагничивание переменным магнитным полем проводили с шагом 5 мТл в диапазоне от 5 до 30 мТл, а в диапазоне от 30 мТл до максимального поля 100 мТл с шагом 10 мТл. По результатам размагничивания методом компонентного анализа (РСА) [11] была рассчитана характеристическая компонента (*ChRM*) остаточной намагниченности, характеризуемая минимальными значениями максимального углового отклонения (*MAD*). Расчет направлений *ChRM* проводился с помощью программы Demagnetization Analysis in Excel [12] с использованием шагов размагничивания от 20 до 70–90 мТл. Также было рассчитано значение медианного разрушающего поля (*MDF AF*). Размагничивание *AF* и расчет *ChRM* были проведены для большей части образцов из колонок МС-2012т и МС-2036т [8] и частично – для колонок 18ВСМ-97т и 20ВСМ-9т.

Объемную магнитную восприимчивость колонок МС-2012т, МС-2036т и 18ВСМ-97т измеряли с помощью прибора Bartington MS2E1 (Bartington, Великобритания) с интервалом 2.5 см. Измерения магнитной восприимчивости по колонкам 20ВСМ-1т, 20ВСМ-9т, 20ВСМ-29т, 20ВСМ-32т и 20ВСМ-46т выполняли в Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук с использованием системы Bartington MS3 (Bartington, Великобритания) и точечного поверхностного датчика Bartington MS2E (шаг измерения – 0.5 см).

Измерения анизотропии магнитной восприимчивости (*AMS*) проводили для колонок 18ВСМ-97т, МС-2012т и МС-2036т в РЦ «Геомодель» Научного парка СПбГУ с помощью каптамоста MFК1-FA (Agico, Чехия) на кубических образцах в трех положениях и с использованием полуавтоматически вращающегося держателя, а на цилиндрах – с использованием автоматически вращающегося держателя.

1.3. Палинологический анализ. Колонка донных отложений МС-2036т была изучена методом спорово-пыльцевого анализа. Проанализировано 29 проб в интервале глубин 0–118 см (в том числе поверхностная донная проба). Обработку проб проводили с применением плавиковой кислоты [13]. Для дальнейшего расчета концентраций пыльцы при лабораторной подготовке добавляли таблетки *Lycopodium* [14]. При расчете процентного соотношения каждого пыльцевого и спорового таксона сумма пыльцы наземных растений, за исключением водных и прибрежно-водных, принималась за 100%. Процентное соотношение спор, грибов и зеленых водорослей рассчитывали исходя из этой суммы. Построение спорово-пыльцевой диаграммы производили в программе *Tilia* [15]. Обработку проб для спорово-пыльцевого анализа проводили в научной лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана Института наук о Земле СПбГУ.

1.4. Микрофаунистический анализ. Пробы, отобранные по колонке МС-2036т, замораживали при температуре -20°C непосредственно на борту судна сразу после отбора. В лаборатории замороженные пробы обрабатывали методом высушивания в критической точке, взвешивали, после чего промывали на двух ситах с ячейками 63 и 125 мкм. Полученные фракции просушивали при температуре $45\text{--}60^{\circ}\text{C}$. Для фораминиферового анализа использовали размерную фракцию > 125 мкм. В каждой пробе определяли видовую принадлежность фораминифер и подсчитывали количество каждого вида.

1.5. Литологическое описание, гранулометрические исследования, данные радиоуглеродного датирования, расчленение верхней части геологического разреза с выделением сейсмотолщ и слагающих их отложений по шести колонкам 20ВСМ и колонке 18ВСМ-97т выполнены коллективом авторов и приведены в работах [1, 3, 4, 16].

2. Результаты исследования

На рис. 2 представлены результаты измерений ЕОН по колонкам, отобранным в западном сегменте Восточно-Сибирского моря. Следует отметить, что часть колонок характеризуется типичными для донных осадков значениями магнитной восприимчивости $(20\text{--}30) \times 10^{-5}$ СИ, возрастая к забою до 40×10^{-5} СИ. При этом величина ЕОН не превышает 0.01 А/м для всех колонок, кроме самой мористой – 20ВСМ-9т и двух образцов на глубине 9–11 см 20ВСМ-35т.

Колонка 20ВСМ-29т вскрыла 35 см плотных сухих глинистых алевролитов. Отложения колонки характеризуются исключительно выдержанным гранулометрическим составом. Палеомагнитные параметры же показывают пилообразно меняющееся от 30° до 75° наклонение ЕОН, тогда как склонение заметно меняется на границе перехода между мягко- и тугопластичными отложениями, величина ЕОН понижается, а магнитная восприимчивость, наоборот, возрастает.

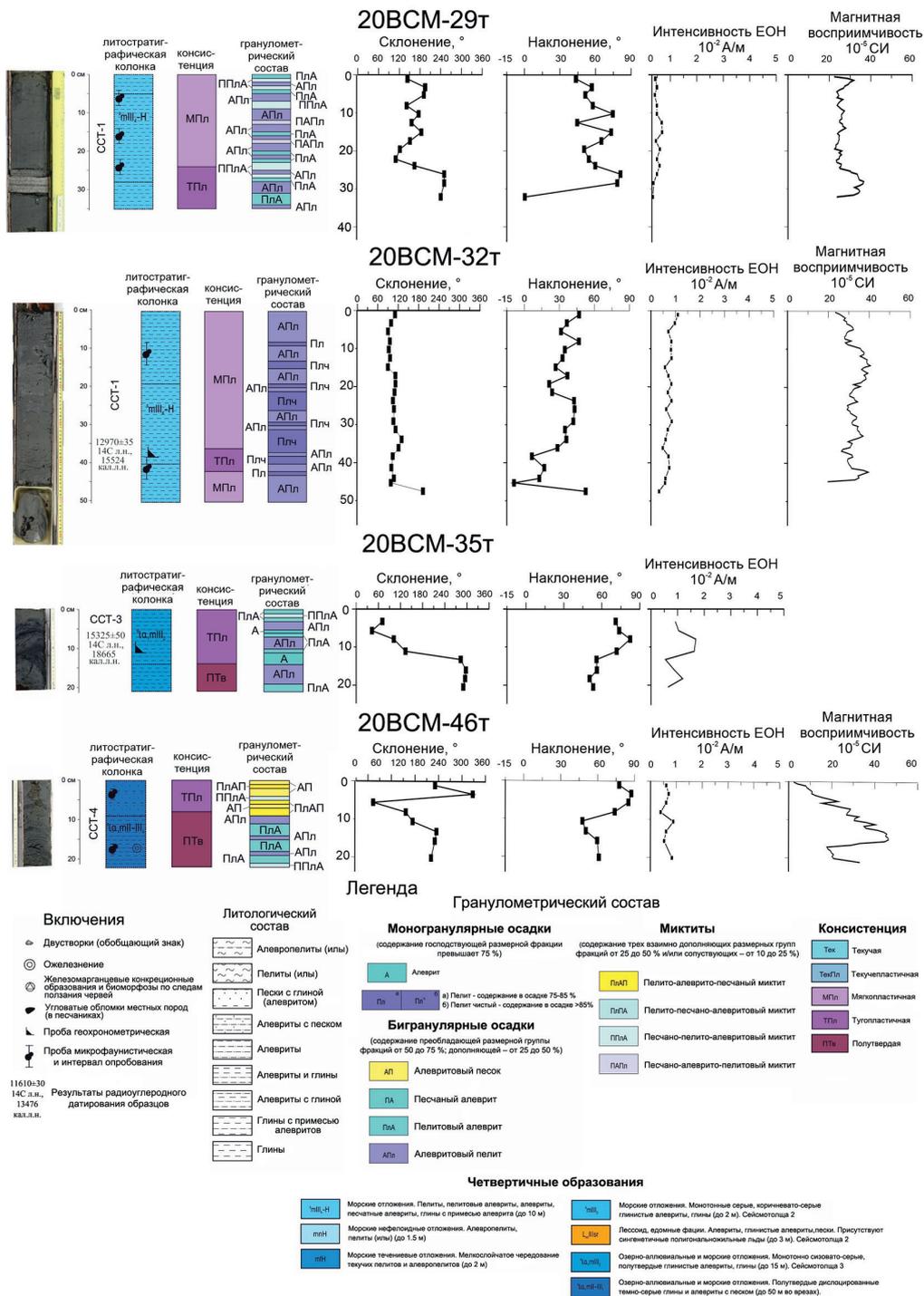
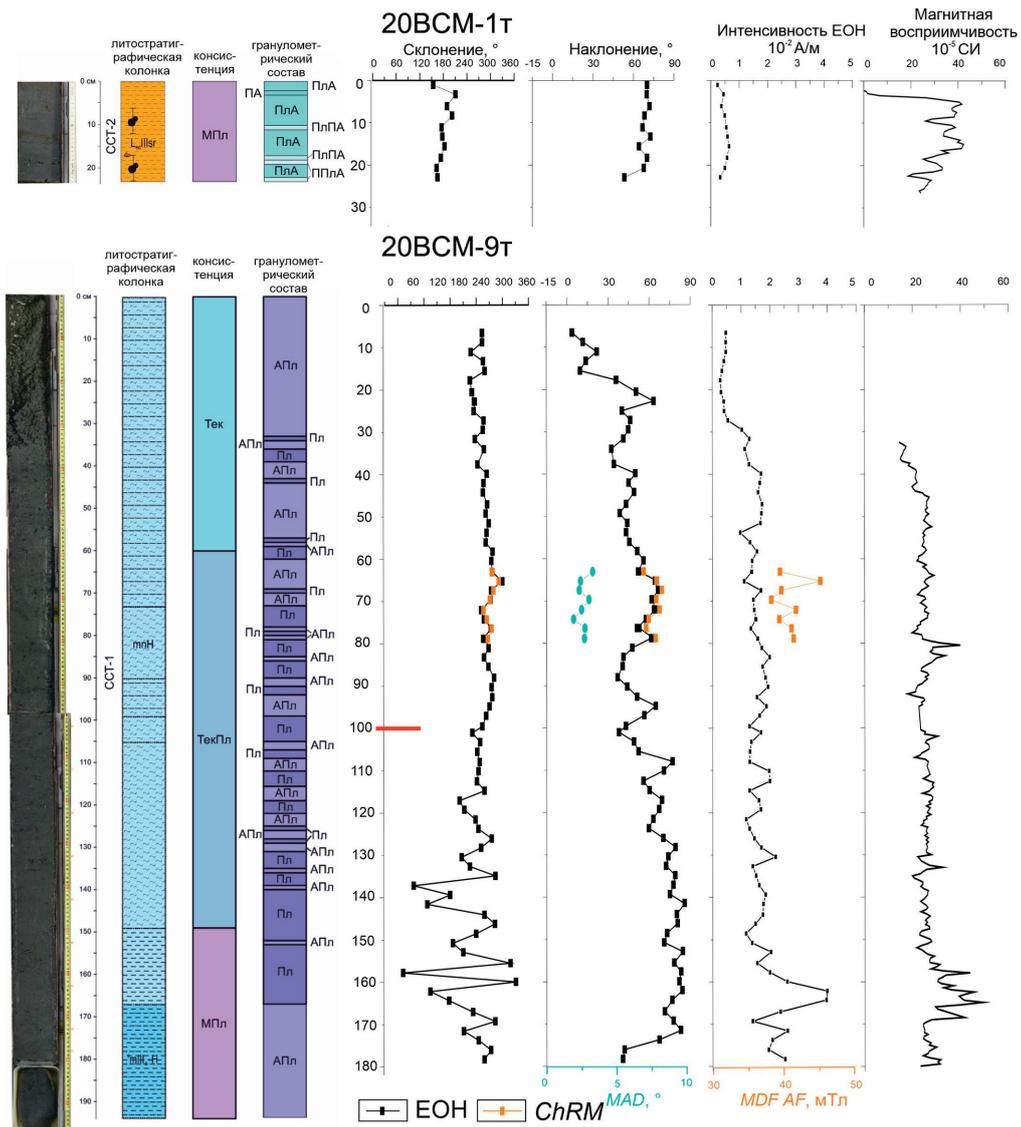


Рис. 2. Результаты палеомагнитных измерений колонок, отобранных в западной части Восточно-Сибирского моря



Продолжение рис. 2. Результаты палеомагнитных измерений колонок, отобранных в западной части Восточно-Сибирского моря

Колонка 20VSM-32т вскрыла 60 см плотных серых алевроглин. В целом верхние 20 см колонки сложены более грубыми отложениями, чем нижние 25 см. Наклонение ЕОН с верха колонки до 45 см уменьшается от 45° до -10° при стабильных склонении, величине ЕОН и магнитной восприимчивости. Все образцы были отобраны из одной, верхней секции колонки (от 0 до 50 см); нарушений осадка не наблюдалось.

Колонка 20VSM-35т отобрана в тальвеге эрозионной ложбины к востоку от острова Новая Сибирь и вскрывает слоистые отложения. Консистенция отложений изменяется от полутвердой до тугопластичной. На этой границе склонение ЕОН поворачивается на 180° вместе с падением наклона приблизительно на 30°.

Отложения колонки 20ВСМ-46т очень плотные, сухие (полутвердые, тугопластичные), с карманом, заполненным песком. Здесь тоже присутствует поворот склона на границе перехода от тугопластичной к полутвердой консистенции.

В колонке 20ВСМ-1т, отобранной южнее, преобладают пелитовые, пелито-песчаные алевритовые миктиты, песчаный алеврит. По изменчивому гранулометрическому составу осадков предполагается активная динамика среды седиментации, либо разнонаправленные источники сноса. При этом наклонение ЕОН стабильно близко к 75° .

Колонка 20ВСМ-9т, самая длинная из изученных в данном секторе, отобрана на пологом склоне седиментационного бассейна. Отложения представлены зеленовато-серыми алевропелитами и пелитами. Наклонения ЕОН после возрастания величины ЕОН на 25 см далее меняются вниз по колонке с 45° до 75° . Глубже 145 см склонение претерпевает частые вариации: особенно выделяется интервал 150–170 см, где также наблюдаются пики магнитной восприимчивости. Рассчитанные $ChRM$ для одного интервала в середине колонки почти не отличаются от значений ЕОН, имеют MAD менее 5 и $MDF AF$ около 45 мТл.

В колонке МС-2012т (рис. 3) с самого верха отмечаются невысокие наклонения $ChRM$, в среднем около 45° , тогда как современное наклонение геомагнитного поля в этой точке равно 82.717° [17]. В верхней части колонки наклонения $ChRM$ чередуются между 40° и 60° , в средней части доходят до отрицательных, возвращаясь в 50 – 60° , и в конце наклонение $ChRM$ восстанавливается, переходя от 50° до 70° . Это также отражается и в интенсивности ЕОН. Максимальное значение MAD равно 15° на глубине 38 см, значения для остальных образцов в основном менее 10° . На глубине 83 см наблюдается единичный образец с отрицательным наклонением. Колонка довольно однородна по цвету и представлена песчаным алевропелитом с включениями и прослоями гидротроилита.

Как и 18ВСМ-97т, колонку МС-2036т составляют высокие положительные наклонения. Причем 18ВСМ-97т демонстрирует более стабильные значения, тогда как у МС-2036т к низу колонки величина намагниченности падает. Вместе с ней постепенно понижается $MDF AF$. На последних трех образцах падает и наклонение $ChRM$ с 76 до 35° (на глубине 108–119 см).

Колонка 18ВСМ-97т имеет распределение осей AMS без видимой определенной закономерности, а у МС-2036т заметно расположение К1 (минимальная ось эллипсоида AMS) преимущественно в одной полосе, а К2 и К3, по крайней мере, для части образцов, располагаются внахлест. Такое распределение является признаком действия сильного течения [18]. При этом магнитные частицы 18ВСМ-97т практически изотропны (максимальное значение показателя анизотропии – 1.015), а МС-2036т обладает максимальной анизотропией магнитной восприимчивости из всех изученных колонок (максимальное значение показателя анизотропии – 1.09). В колонке МС-2012т, наоборот, согласно измерениям AMS , осадконакопление происходило в спокойных условиях, что характеризуется распределением осей эллипсоида AMS , где К1 находится в центре, а К2 и К3 – по экватору и не имеют определенной закономерности [18, 19].

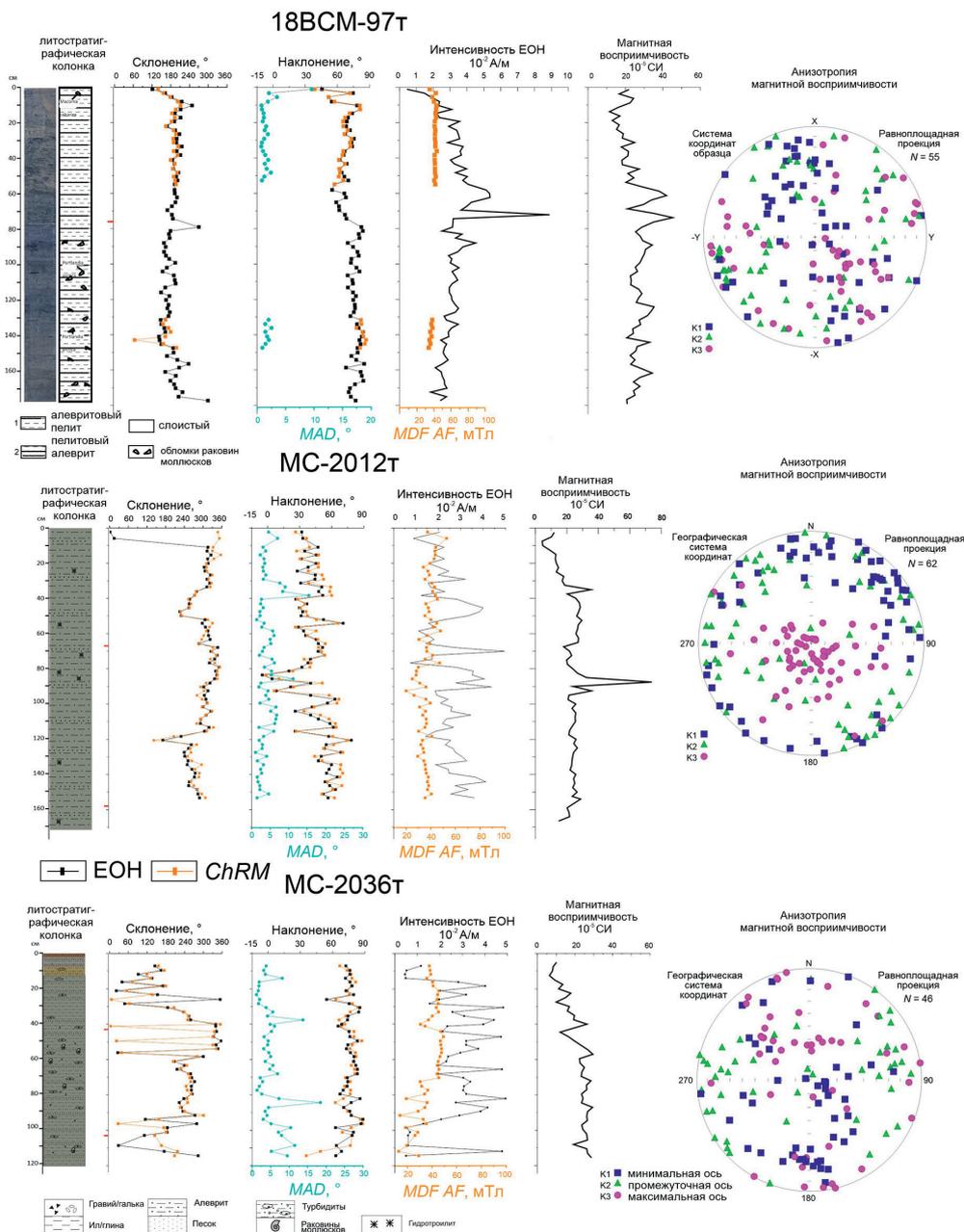


Рис. 3. Результаты палеомагнитных исследований колонок донных осадков, отобранных в центральной части Восточно-Сибирского моря

По результатам палинологического анализа образцов колонки MC-2036t было выделено 14 пыльцевых и 5 споровых таксонов (подробнее это описано в работе [20]). Была составлена спорово-пыльцевая диаграмма (рис. 4), на которой можно выделить три пыльцевые зоны. Концентрация пыльцы не превышает 2500 пыльцевых зерен на мг осадка и постепенно уменьшается вверх по колонке. В спектрах по всей глубине колонки доминирует пыльца трав, преимущественно осоковых и злаков. В группе древесных и кустарниковых растений преобладает пыльца бе-

резы, ольхи и ивы. Содержание спор в спектрах незначительно. Основу данной группы составляют споры папоротников и сфагновых мхов. Помимо этого, во всех образцах отмечается наличие переотложенных спор и пыльцы, процентное содержание которых увеличивается к верхней части. Основу спектра в данной группе составляют переотложенная пыльца голосеменных и дочетвертичные споры.

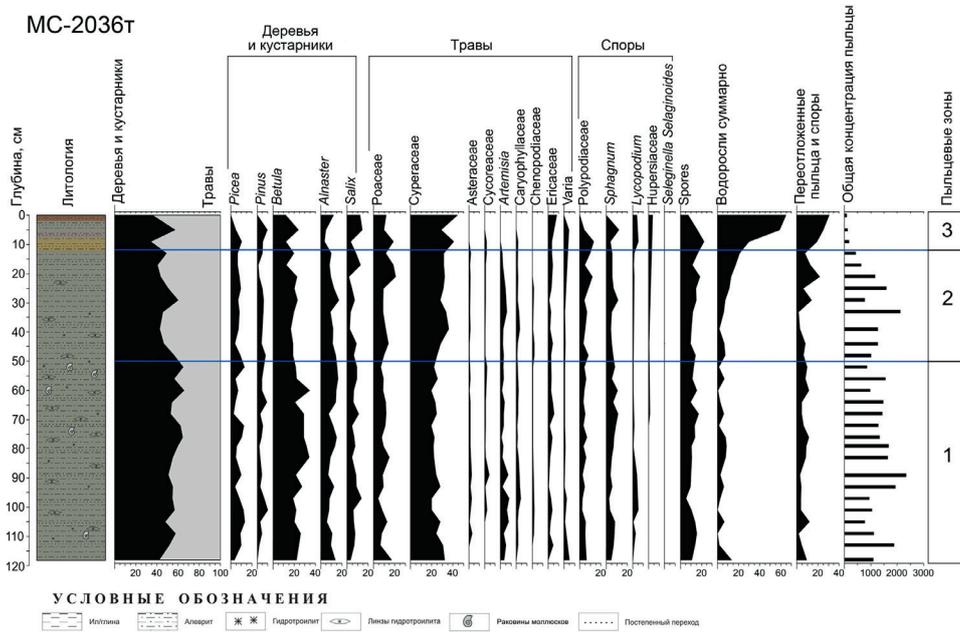


Рис. 4. Споро-пыльцевая диаграмма колонки МС-2036т (палинолог Н.А. Костромина)

В исследованных пробах из колонки МС-2036т было выявлено 49 форм бентосных фораминифер, из них 41 определены до вида, большая часть микрофауны представлена бентосными формами с известковой раковиной (рис. 5).

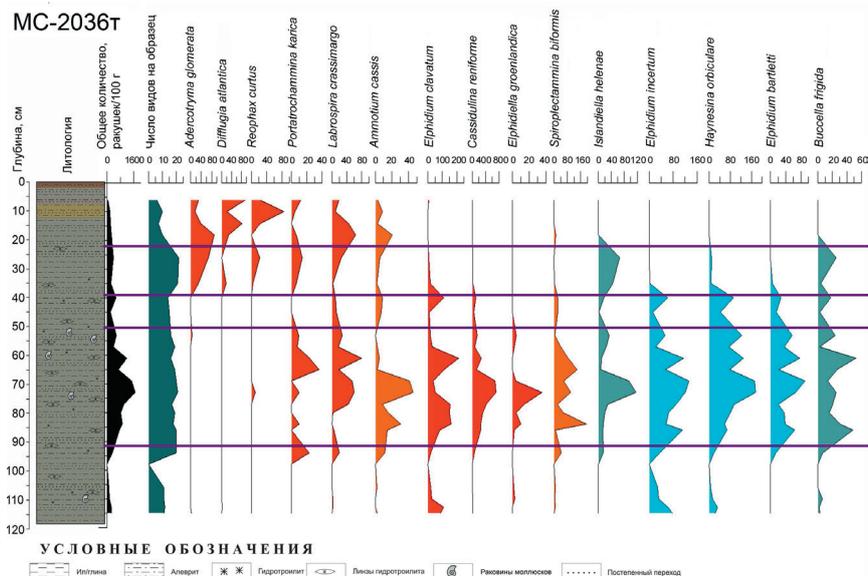


Рис. 5. Результаты микрофаунистического анализа

Планктонные фораминиферы в изученных образцах отсутствуют. В изученной колонке фораминиферы встречаются по всей длине, наполненность образцов и видовое разнообразие свидетельствуют об автохтонности сообществ фораминифер. В целом видовой состав фораминифер в изученном разрезе является обычным для шельфа северных морей [21, 22] и говорит о голоценовом возрасте изученных отложений. Основу комплекса составляют типичные арктические виды, характерные для внутреннего мелководного шельфа, и солоновато-водные виды.

3. Обсуждение результатов

Согласно радиоуглеродным возрастам и выделенным сейсмотолщам [1, 16], изученные колонки представляют собой отложения от позднего неоплейстоцена до голоцена. В большей части исследованных колонок на кривой наклонений не наблюдаются ярко выраженные реперные события. При этом в колонке 20ВСМ-32т на глубине радиоуглеродного возраста около 15 тыс. кал. л. н., полученного по рассеянной органике, т. е., скорее всего, удревненного, наблюдается единственное отрицательное наклонение, полученное для этой части Восточно-Сибирского моря, которое может соответствовать экскурсу геомагнитного поля Гетеборг (9–12 тыс. кал. л. н., см., например, работу [23]), отмеченного в отложениях Баренцева моря [24]. В более древней колонке – 20ВСМ-35т (18 тыс. кал. л. н.) – такого поведения уже не наблюдается.

В то же время колонка 18ВСМ-97т, отобранная в центральной части Восточно-Сибирского моря в 7 км от колонки 18ВСМ-96т, для которой в интервале 169–170 см радиоуглеродный возраст определен как 21 753 кал. л. н. [1], не имеет никаких признаков фиксации экскурсов геомагнитного поля. В той же работе отмечается, что отложения нижней части колонки 18ВСМ-97т накапливались в мелководном пресноводном бассейне вблизи источников терригенного материала в позднем плейстоцене – раннем голоцене, а с 60–65 см условия резко изменились в результате морской трансгрессии.

Сейсмоакустическое профилирование и съемка многолучевым эхолотом в районе отбора колонок МС-2012т и МС-2036т, выполненные в ходе работ ФГБУ «ВНИИОкеангеология» в пределах листов S-57, 58 [2], показали, что поверхность дна покрыта многочисленными следами ледового выпахивания. Борозды имеют линейный характер, но различную ориентировку. Глубина борозд достигает 2–3 м. Эти данные свидетельствуют в пользу определенного перемещения осадков килевыми частями льдов, что может быть одной из причин заниженных наклонений в колонке МС-2012т. При этом по данным *AMS* осадконакопление происходило в спокойных условиях, поэтому, вероятно, имело место относительно быстрое переосаждение нарушенного осадка.

Кроме того, в колонках 20ВСМ-35т и 20ВСМ-46т, неоплейстоценового возраста, четко отражается граница смены консистенции отложений, что может говорить о резкой смене условий осадконакопления. Нарушения осадка в ходе его разрезания и во время пробоотбора не отмечались, а колонки 20ВСМ-35т и 20ВСМ-46т состояли из единичных ненарушенных секций, из которых сплошным образом отбирались кубики на палеомагнитные исследования. При этом предполагается, что отложения, вскрытые колонкой 20ВСМ-35т, дислоцированы, очевидно, при выпахивающем воздействии льда.

Также у колонок из центрально-северной части Восточно-Сибирского моря отмечаются более высокие значения величин ЕОН и магнитной восприимчивости и присутствует некоторая цикличность изменения склонения и наклонения.

Реконструкция динамики растительности по колонке МС-2036т затруднена из-за низкой концентрации пыльцевых зерен и значительной доли переотложенных форм. Перенос пыльцевых зерен происходил, вероятнее всего, под действием нескольких причин, таких как эоловый перенос и перемещение водными потоками. В период формирования изученных палиноспектров значительных изменений в условиях развития растительности не происходило. В период формирования отложений нижней части колонки можно предполагать существование арктических тундр на ближайшей суше. При этом наличие пыльцы ольховника может свидетельствовать о том, что граница типичных тундр находилась севернее, чем современная. Пыльцевые спектры палинозоны 1 (наиболее стабильной) достаточно хорошо согласуются с пыльцевыми спектрами голоценовых отложений острова Большой Ляховский [25]. Спорово-пыльцевые спектры морских отложений, изученных в восточной части Восточно-Сибирского моря [4], также характеризуют тундровую растительность, однако в них отмечается большая доля пыльцы хвойных пород, что может быть связано с более близким положением границы леса. Кроме того, от середины палинозоны 1 до конца колонки наклонения *ChRM* начинают колебаться, пока к концу колонки не снижаются. Также меняются и другие параметры. Можно предположить, что на этой глубине проходит нижняя граница голоцена, маркируемая экскурсом Гетеборг, хотя, опять же, сомнения вызывает появление такого эпизода на самом конце колонки.

По бентосным фораминиферам в разрезе колонки МС-2036т прослеживается влияние на данный район речного стока разной степени интенсивности. В нижнем интервале (94–117 см) колонки МС-2036т малочисленность сообщества, низкое видовое разнообразие, доминирование вида-оппортуниста (*E. clavatum*) и вида, характерного для опресненных условий (*E. incertum*), позволяют сделать заключение о нестабильных олиготрофных условиях с сильным опреснением. Его сменяет интервал колонки 53–88 см с сообществом, характеризующимся высокой численностью и видовым разнообразием. Исходя из наличия многочисленных раковин двустворчатых моллюсков и присутствия тепловодного вида фораминифер *Asterillina pulchella*, можно предположить наличие температурного оптимума в этом интервале. На протяжении всего интервала фиксируется сильное опресняющее влияние речного стока. Далее идет переходный интервал (40–47 см), в котором общая численность и разнообразие фораминифер сокращается, а присутствующие виды являются показателями солоновато-водных и нестабильных условий. Интервал 26–38 см характеризуется высокой продуктивностью атлантических вод и сезонным присутствием морского льда. Верхний интервал 6–20 см представлен исключительно агглютинированными формами фораминифер. Это холодноводный комплекс, характерный для современного внутреннего арктического шельфа. Присутствие же единичных раковин *Ammotium cassis* говорит о слабом влиянии речного стока на данный район. Изменения во влиянии речного стока также отражаются на вариациях склонения *ChRM* колонки МС-2036т, которые четко следуют выделенным интервалам сообществ бентосных фораминифер (см. рис. 3 и 5). Таким образом, совокупно оба метода фиксируют изменчивость проявления течений в исследуемом осадке, подтверждаемую также распределением осей эллипсоида *AMS*.

Таким образом, например, в отличие от соседнего Чукотского шельфа, где скважинами вскрыты и отрицательно намагниченные дочетвертичные образования, возраст изученных осадков Восточно-Сибирского моря позднеплейстоцен–голоценовый.

Заключение

Слабая изученность и сложность строения верхних горизонтов осадочного чехла Восточно-Сибирского шельфа, как и других арктических морей, не позволяют уверенно датировать отражающие горизонты на сейсмоакустических профилях и колонки осадков из грунтовых трубок.

Первые результаты палеомагнитных исследований, проведенных по колонкам донных осадков из разных частей моря, продемонстрировали, насколько палеомагнитный метод может быть чувствителен к изменениям условий осадконакопления. Колонки показали сильно отличающуюся картину, что может характеризовать меняющиеся условия осадконакопления от одного района Восточно-Сибирского моря к другому, а также особенности рельефа морского дна в конкретной точке прободора. Для более полноценного результата требуется сосредоточиться на менее обширных площадях восточно-арктического шельфа и проводить исследования на более детально опробованных колонках донных осадков в рамках сети разрезов. Тем не менее палеомагнитный метод вместе с данными палинологического и микрофаунистического анализа позволил определить позднеплейстоцен–голоценовый возраст вскрытых колонками донных осадков Восточно-Сибирского моря.

Благодарности. Аналитические исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-27-00412, <https://rscf.ru/project/22-27-00412/>.

Литература

1. Буданов Л.М., Сергеев А.Ю., Жамойда В.А., Рябчук Д.В., Невин И.А., Носевич Е.С., Пушина З.В., Григорьев А.Г., Прищепенко Д.В., Петров О.В., Баширова Л.Д., Пономаренко Е.П. Новые данные по сеймостратиграфии и палеогеографическому развитию Восточно-Сибирского моря // Региональная геология и металлогения. 2022. № 92. С. 5–27. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2022_92_5-27.
2. Гусев Е.А., Крылов А.А., Маев П.А., Понимаскин А.И., Озеров И.С., Пронин И.С., Бирюков Е.А., Рыбницкий Е.Е., Задорожный Т.Н., Покровская С.О. Результаты сейсмоакустического профилирования в западной части Восточно-Сибирского моря // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. Вып. 8. С. 58–61. <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2021-8-58-61>.
3. Жамойда В.А., Сергеев А.Ю., Буданов Л.М., Носевич Е.С., Рябчук Д.В., Григорьев А.Г., Пономаренко Е.П. Новые данные о формировании плиоцен-четвертичных отложений Восточно-Сибирского моря по результатам геологического картирования акваториальной части листов R-56-60 // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2020. Вып. 7. С. 66–75. <https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10710>.
4. Ryabchuk D.V., Sergeev A.Y., Budanov L.M., Zhamoida V.A., Nosevich E.S., Pushina Z.V., Grigoriev A.G., Neevin I.A., Bashirova L.D., Ponomarenko E.V., Prishchepencko D.V. New data on the geological development of the southern part of the East Siberian Sea in the late Pleistocene-Holocene // Oceanology. 2022. V. 62, No 6. P. 903–918. <https://doi.org/10.1134/S0001437022400041>.
5. Гусев Е.А., Рекант П.В., Большианов Д.Ю., Лукашенко Р.В., Попко А.О. Псевдогляциальные структуры подводных гор поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан) и континентальной окраины Восточно-Сибирского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 4(98). С. 43–55.

6. *Astakhov A.S., Babich V.V., Shi X., Hu L., Obrezkova M.S., Aksentov K.I., Alatorsev A.V., Darin A.V., Kalugin I.A., Karnaukh V.N., Melgunov M.S.* Climate and ice conditions of East Siberian Sea during Holocene: Reconstructions based on sedimentary geochemical multiproxy // *The Holocene*. 2023. V. 33, No 1. P. 3–13. <https://doi.org/10.1177/09596836221126049>.
7. *Кочегура В.В.* Применение палеомагнитных методов при геологической съемке шельфа. СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 1992. 143 с.
8. *Элькина Д.В., Гостенина А.А., Пискарев А.Л., Гусев Е.А.* Первые результаты палеомагнитных исследований по колонкам донных осадков, опробованным в Восточно-Арктических морях // *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2021. Вып. 8. С. 302–308. <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2021-8-302-308>.
9. *Gusev E.A., Andreeva I.A., Anikina N.Y., Bondarenko S.A., Derevyanko L.G., Iosifidi A.G., Klyuvitkina T.S., Litvinenko I.V., Petrova V.I., Polyakova E.I., Popov V.V., Stepanova A.Y.* Stratigraphy of Late Cenozoic sediments of the western Chukchi Sea: New results from shallow drilling and seismic-reflection profiling // *Global Planet. Change*. 2009. V. 68, No 1–2. P. 115–131. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.03.025>.
10. *Гусев Е.А., Крылов А.А., Яржембовский Я.Д., Элькина Д.В., Новихина Е.С., Костромин Н.А., Комаров А.Ю., Горбунов Д.А., Бочкарев А.В., Захаров В.Ю.* О первых результатах проведения морских геологосъемочных работ масштаба 1:1 000 000 в рамках листов Государственной геологической карты РФ S-57, 58 (Восточно-Сибирское море) // *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2020. Вып. 7. С. 52–59. <https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10708>.
11. *Kirschvink J.L.* The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data // *Geophys. J. Int.* 1980. V. 62, No 3. P. 699–718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x>.
12. *Sagnotti L.* Demagnetization Analysis in Excel (DAIE). An open source workbook in Excel for viewing and analyzing demagnetization data from paleomagnetic discrete samples and u-channels // *Ann. Geophys.* 2013. V. 56, No 1. Art. D0114. <https://doi.org/10.4401/ag-6282>.
13. *Berglund B.E., Ralska-Jasiewiczowa M.* Pollen analysis and pollen diagrams // *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology* / Ed. by B.E. Berglund. International Geological Correlation Programme, Project 158B. Chichester: John Wiley & Sons, 1986. P. 455–484.
14. *Stockmarr J.* Tablets with spores used in absolute pollen analysis // *Pollen Spores*. 1971. V. 13. P. 615–621.
15. Tilia software. URL: <https://www.neotomadb.org/apps/tilia>.
16. *Сергеев А.Ю., Рябчук Д.В., Жамойда В.А., Буданов Л.М., Ковалева О.А., Неевин И.А., Токарев М.Ю., Баширова Л.Д., Пономаренко Е.П.* Морфология и генезис подводных валов и гряд Восточно-Сибирского моря // *Геоморфология и палеогеография*. 2023. Т. 54, № 3. С. 26–38. <https://doi.org/10.31857/S294917892303009X>.
17. World Magnetic Model 2020 Calculator. URL: https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/wmm_calc.html.
18. *Tauxe L.* Essentials of Paleomagnetism. Berkeley: Univ. of Calif. Press, 2010. xvi, 489 p. <https://doi.org/10.1525/9780520946378>.
19. *Nowaczyk N.R., Frederichs T.W., Kassens H., Nørgaard-Pedersen N., Spielhagen R.F., Stein R., Weiel D.* Sedimentation rates in the Makarov Basin, central Arctic Ocean: A paleomagnetic and rock magnetic approach // *Paleoceanogr. Paleoclimatol.* 2001. V. 16, No 4. P. 368–389. <https://doi.org/10.1029/2000PA000521>.

20. *Костромина Н.А., Гусев Е.А., Крылов А.А., Крылов А.В.* Палинологическая характеристика донных отложений западной части Восточно-Сибирского моря // Палеонтология, стратиграфия и палеогеография мезозоя и кайнозоя бореальных районов: материалы научной онлайн-сессии, посвященной 110-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР Владимира Николаевича Сакса. Новосибирск, 2021. С. 305–307.
21. *Таманова С.В.* Видовой состав современных фораминифер как индикатор гидрологического режима арктических морей // Северный Ледовитый океан и его побережье в кайнозое. Л.: Гидрометеиздат, 1970. С. 199–203.
22. *Taldenkova E., Bauch H.A., Stepanova A., Ovsepyan Y., Pogodina I., Klyuvitkina T., Nikolaev S.* Benthic and planktic community changes at the north Siberian margin in response to atlantic water mass variability since last deglacial times // *Mar. Micropaleontol.* 2012. V. 96–97. P. 13–28. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2012.06.007>.
23. *Chen Z., Yuan F., Zhang J., Shen S., Li X., Li X., Huang M., Jowitt S.M.* Paleomagnetic evidence for the Gothenburg geomagnetic excursion during the Pleistocene–Holocene transition recorded in the Paleo-Danyang Lake, eastern China // *J. Asian Earth Sci.* 2020. V. 201. Art. 104140. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104140>.
24. *Гуськова Е.Г., Распопов О.М., Пискарев А.Л., Дергачев В.А.* Проявление excursа геомагнитного поля Гетенбург в донных осадках Баренцева моря // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47, № 6. С. 825–830.
25. *Andreev A.A., Schirrmeyer L., Tarasov P.E., Ganopolski A., Brovkin V., Siebert C., Wetterich S., Hubberten H.-W.* Vegetation and climate history in the Laptev Sea region (Arctic Siberia) during Late Quaternary inferred from pollen records // *Quat. Sci. Rev.* 2011. V. 30, No 17–18. P. 2182–2199. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.12.026>.

Поступила в редакцию 04.10.2023

Принята к публикации 22.11.2023

Элькина Дарья Владимировна, ведущий инженер отдела морской сейсморазведки

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. И.С. Грамберга» (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»)

Английский проспект, д. 1, г. Санкт-Петербург, 190121, Россия

E-mail: darielfly@gmail.com

Гусев Евгений Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, начальник отдела геологического картирования

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. И.С. Грамберга» (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»)

Английский проспект, д. 1, г. Санкт-Петербург, 190121, Россия

E-mail: gus-evgeny@yandex.ru

Рябчук Дарья Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, начальник отдела региональной геоэкологии и морской геологии

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского» (ФГБУ «ВСЕГЕИ»)

Средний проспект В.О., д. 74, г. Санкт-Петербург, 199106, Россия

E-mail: daria_ryabchuk@mail.ru

Сергеев Александр Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник отдела региональной геоэкологии и морской геологии

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского» (ФГБУ «ВСЕГЕИ»)

Средний проспект В.О., д. 74, г. Санкт-Петербург, 199106, Россия

E-mail: sergeevau@yandex.ru

Костромина Наталья Андреевна, научный сотрудник отдела геологического картирования; ассистент кафедры геоморфологии Института наук о Земле

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. И.С. Грамберга» (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»)

Английский проспект, д. 1, г. Санкт-Петербург, 190121, Россия

Санкт-Петербургский государственный университет

Университетская наб., д. 7/9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: kostromina132@gmail.com

Новихина Елизавета Станиславовна, научный сотрудник отдела геологического картирования

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. И.С. Грамберга» (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»)

Английский проспект, д. 1, г. Санкт-Петербург, 190121, Россия

E-mail: khelizaveta@yandex.ru

Гостенина Анна Анатольевна, магистрант кафедры геофизики Института наук о Земле

Санкт-Петербургский государственный университет

Университетская наб., д. 7/9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: annaghost888@gmail.com

Яржембовский Ярослав Дмитриевич, ведущий инженер, отдела геологического картирования

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. И.С. Грамберга» (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»)

Английский проспект, д. 1, г. Санкт-Петербург, 190121, Россия

E-mail: greenz@yandex.ru

Пискарев Алексей Лазаревич, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник отдела морской сейсморазведки; профессор кафедры геофизики Института наук о Земле

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. И.С. Грамберга» (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»)

Английский проспект, д. 1, г. Санкт-Петербург, 190121, Россия

Санкт-Петербургский государственный университет

Университетская наб., д. 7/9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: apiskarev@googlegmail.com

Крылов Алексей Алексеевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник отдела геологического картирования

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. И.С. Грамберга» (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»)

Английский проспект, д. 1, г. Санкт-Петербург, 190121, Россия

E-mail: akrylow@gmail.com

Ованесян Георгий Иванович, ведущий инженер отдела морской сейсморазведки

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. И.С. Грамберга» (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»)

Английский проспект, д. 1, г. Санкт-Петербург, 190121, Россия

E-mail: goshovan@yandex.ru

Жамойда Владимир Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник отдела региональной геоэкологии и морской геологии

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского» (ФГБУ «ВСЕГЕИ»)

Средний проспект В.О., д. 74, г. Санкт-Петербург, 199106, Россия

E-mail: Vladimir_Zhamoida@vsegei.ru

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.646-663

First Results of the Comprehensive Analysis, Including the Paleomagnetic Studies, of Sediment Cores from the East Siberian Sea

D.V. Elkina^{a,b}, E.A. Gusev^{a**}, D.V. Ryabchuk^{b***}, A.Yu. Sergeev^{b****},
N.A. Kostromina^{a,c*****}, E.S. Novikhina^{a*****}, A.A. Gostenina^{c*****},
Ya.D. Yarzhembovsky^{a*****}, A.L. Piskarev^{a,c*****}, A.A. Krylov^{a*****},
G.I. Ovanesyana^{a*****}, V.A. Zhamoida^{b*****}*

^a*Gramberg All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean (VNI Okeangeologia), St. Petersburg, 190121 Russia*

^b*A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI), St. Petersburg, 199106 Russia*

^c*St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia*

E-mail: **darielfly@gmail.com*, ***gus-evgeny@yandex.ru*, ****daria_ryabchuk@mail.ru*,
*****sergeevau@yandex.ru*, ******kostromina132@gmail.com*, ******khelizaveta@yandex.ru*,
******annaghost888@gmail.com*, ******greenz@yandex.ru*, ******apiskarev@googlemail.com*,
******akrylow@gmail.com*, ******goshovan@yandex.ru*, ******Vladimir_Zhamoida@vsegei.ru*

Received October 4, 2023; Accepted November 22, 2023

Abstract

The bottom sediments of the Russian Arctic seas have been studied to varying degrees. The least attention has been paid to the East Siberian Sea, the Quaternary geology of which remains largely overlooked. This article summarizes the results of a comprehensive research on the East Siberian Sea, including the first paleomagnetic analysis of nine sediment cores collected during three cruise expeditions as part of the program “State Geological Mapping of the Territory and Continental Shelf of the Russian Federation at the Scale of 1:1 000 000”. The results obtained show that the processes and conditions of sedimentation vary in different parts of the East Siberian Sea.

Keywords: East Siberian Sea, bottom sediments, Holocene-Quaternary sediments, Arctic shelf, paleomagnetic studies, palynological analysis, microfaunal analysis

Acknowledgements. Analytical studies were supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-27-00412, <https://rscf.ru/project/22-27-00412/>).

Figure Captions

Fig. 1. Coring sites during the expeditions of 2018–2020 in the East Siberian Sea: 1 – the expedition of 2020, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute; 2 – the expedition of 2020, Gramberg All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean; 3 – the expedition of 2018, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute; 4 – the sediment cores used in the paleomagnetic studies.

Fig. 2. Paleomagnetic results on the sediment cores collected in the western part of the East Siberian Sea. Continued on the next page.

Fig. 3. Paleomagnetic results on the sediment cores collected in the central part of the East Siberian Sea.

Fig. 4. Palynological diagram for the sediment core MS-2036t (by palynologist N.A. Kostromina).

Fig. 5. Results of the microfaunal analysis.

References

1. Budanov L.M., Sergeev A.Yu., Zhamoida V.A., Ryabchuk D.V., Neevin I.A., Nosevich E.S., Pushina Z.V., Grigor'ev A.G., Prishchepenko D.V., Petrov O.V., Bashirova L.D., Ponomarenko E.V. New data on seismic stratigraphy and palaeogeography of the East Siberian Sea. *Reg. Geol. Metallog.*, 2022, no. 92, pp. 5–27. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2022_92_5-27. (In Russian)
2. Gusev E.A., Krylov A.A., Maev P.A., Ponimaskin A.I., Ozerov I.S., Pronin I.S., Biryukov E.A., Rybnitsky E.E., Zadorozhny T.N., Pokrovskaya S.O. Results of seismo-acoustic profiling in the western part of the East Siberian Sea. *Rel'ef Chetvertichn. Obraz. Arkt., Subarkt. Sev.-Zapada Ross.*, 2021, no. 8, pp. 58–61. <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2021-8-58-61>. (In Russian)
3. Zhamoida V.A., Sergeev A.Yu., Budanov L.M., Nosevich E.S., Ryabchuk D.V., Grigoriev A.G., Ponomarenko E.P. New data on the formation of the Pliocene-Quaternary deposits of the East Siberian Sea from the results of geological off-shore mapping of R-56-60 sheets of the State Geological Map. *Rel'ef Chetvertichn. Obraz. Arkt., Subarkt. Sev.-Zapada Ross.*, 2020, no. 7, pp. 66–75. <https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10710>. (In Russian)
4. Ryabchuk D.V., Sergeev A.Y., Budanov L.M., Zhamoida V.A., Nosevich E.S., Pushina Z.V., Grigoriev A.G., Neevin I.A., Bashirova L.D., Ponomarenko E.V., Prishchepenko D.V. New data on the geological development of the southern part of the East Siberian Sea in the late Pleistocene–Holocene. *Oceanology*, 2022, vol. 62, no. 6, pp. 903–918. <https://doi.org/10.1134/S0001437022400041>.
5. Gusev E.A., Rekant P.V., Bolshiyarov D.Yu., Lukashenko R.V., Popko A.O. Pseudoglacial structures of Mendeleev Rise Seamounts (Arctic Ocean) and East Siberian continental margin. *Probl. Arkt. Antarkt.*, 2013, no. 4(98), pp. 43–55. (In Russian)
6. Astakhov A.S., Babich V.V., Shi X., Hu L., Obrezkova M.S., Aksentov K.I., Alatortsev A.V., Darin A.V., Kalugin I.A., Karnaukh V.N., Melgunov M.S. Climate and ice conditions of East Siberian Sea during Holocene: Reconstructions based on sedimentary geochemical multiproxy. *The Holocene*, 2023, vol. 33, no. 1, pp. 3–13. <https://doi.org/10.1177/09596836221126049>.
7. Kochegura V.V. *Primenenie paleomagnitnykh metodov pri geologicheskoi s'emke shel'fa* [Paleomagnetic Methods Applied in Geological Surveying of the Shelf]. St. Petersburg, VSEGEI, 1992. 143 p. (In Russian)
8. Elkina D.V., Gostenina A.A., Piskarev A.L., Gusev E.A. First results of paleomagnetic studies on sediment cores from the Eastern Arctic seas. *Rel'ef Chetvertichn. Obraz. Arkt., Subarkt. Sev.-Zapada Ross.*, 2021, no. 8, pp. 302–308. <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2021-8-302-308>. (In Russian)
9. Gusev E.A., Andreeva I.A., Anikina N.Y., Bondarenko S.A., Derevyanko L.G., Iosifidi A.G., Klyuvitkina T.S., Litvinenko I.V., Petrova V.I., Polyakova E.I., Popov V.V., Stepanova A.Y. Stratigraphy of Late Cenozoic sediments of the western Chukchi Sea: New results from shallow drilling and seismic-reflection profiling. *Global Planet. Change*, 2009, vol. 68, nos. 1–2, pp. 115–131. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.03.025>.
10. Gusev E.A., Krylov A.A., Yarzhembovsky Ya.D., Elkina D.V., Novikhina E.S., Kostromina N.A., Komarov A.Yu., Gorbunov D.A., Bochkarev A.V., Zakharov V.Yu. On the first results of marine survey with scale of 1:1 000 000 within the sheets of the State Geological Map of the Russian Federation S-57.58 (East Siberian Sea). *Rel'ef Chetvertichn. Obraz. Arkt., Subarkt. Sev.-Zapada Ross.*, 2020, no. 7, pp. 52–59. <https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10708>. (In Russian)
11. Kirschvink J.L. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophys. J. Int.*, 1980, vol. 62, no. 3, pp. 699–718. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb02601.x>.
12. Sagnotti L. Demagnetization Analysis in Excel (DAIE). An open source workbook in Excel for viewing and analyzing demagnetization data from paleomagnetic discrete samples and u-channels. *Ann. Geophys.*, 2013, vol. 56, no. 1, art. D0114. <https://doi.org/10.4401/ag-6282>.
13. Berglund B.E., Ralska-Jasiewiczowa M. Pollen analysis and pollen diagrams. In: Berglund B.E. (Ed.) *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. International Geological Correlation Programme, Project 158B. Chichester, John Wiley & Sons, 1986. pp. 455–484.
14. Stockmarr J. Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen Spores*, 1971, vol. 13, pp. 615–621.
15. Tilia software. URL: <https://www.neotomadb.org/apps/tilia>.
16. Sergeev A.Yu., Ryabchuk D.V., Zhamoida V.A., Budanov L.M., Kovaleva O.A., Neevin I.A., Tokarev M.Yu., Bashirova L.D., Ponomarenko E.P. Morphology and genesis of underwa-

- ter bars and ridges of the East Siberian Sea. *Geomorphol. Paleogeogr.*, vol. 54, no. 3, pp. 26–38. <https://doi.org/10.31857/S294917892303009X>. (In Russian)
17. World Magnetic Model 2020 Calculator. URL: https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/wmm_calc.html.
 18. Tauxe L. *Essentials of Paleomagnetism*. Berkeley, Univ. of Calif. Press, 2010. xvi, 489 p. <https://doi.org/10.1525/9780520946378>.
 19. Nowaczyk N.R., Frederichs T.W., Kassens H., Nørgaard-Pedersen N., Spielhagen R.F., Stein R., Weiel D. Sedimentation rates in the Makarov Basin, central Arctic Ocean: A paleomagnetic and rock magnetic approach. *Paleoceanogr. Paleoclimatol.*, 2001, vol. 16, no. 4, pp. 368–389. <https://doi.org/10.1029/2000PA000521>.
 20. Kostromina N.A., Gusev E.A., Krylov A.A., Krylov A.V. A palynological study of sediments from the western part of the East Siberian Sea. In: *Paleontologiya, stratigrafiya i paleogeografiya mezozoya i kainozoya boreal'nykh raionov: materialy nauchnoi onlain-sessii, posvyashchennoi 110-letiyu so dnya rozhdeniya chlena-korrespondenta AN SSSR Vladimira Nikolaevicha Saksa* [Paleontology, Stratigraphy, and Paleogeography of the Mesozoic and Cenozoic Boreal Regions: Proc. Sci. Online Sess. Dedicated to the 110th Anniversary of the Birth of Vladimir Nikolaevich Saks, Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences]. Novosibirsk, 2021. pp. 305–307. (In Russian)
 21. Tamanova S.V. Species composition of modern foraminifera as an indicator of the Arctic seas' hydrological regime. In: *Severnyy Ledovityy okean i ego poberezh'e v kainozoe* [The Arctic Ocean and Its Coast in the Cenozoic Era]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1970, pp. 199–203. (In Russian)
 22. Taldenkova E., Bauch H.A., Stepanova A., Ovsepyan Y., Pogodina I., Klyuvitkina T., Nikolaev S. Benthic and planktic community changes at the north Siberian margin in response to Atlantic water mass variability since last deglacial times. *Mar. Micropaleontol.*, 2012, vols. 96–97, pp. 13–28. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2012.06.007>.
 23. Chen Z., Yuan F., Zhang J., Shen S., Li X., Li X., Huang M., Jowitt S.M. Paleomagnetic evidence for the Gothenburg geomagnetic excursion during the Pleistocene–Holocene transition recorded in the Paleo-Danyang Lake, eastern China. *J. Asian Earth Sci.*, 2020, vol. 201, art. 104140. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2019.104140>.
 24. Guskova E.G., Raspopov O.M., Piskarev A.L., Dergachev V.A. Manifestation of the Gothenburg geomagnetic field excursion in the Barents Sea bottom sediments. *Geomagn. Aeron.*, 2007, vol. 47, no. 6, pp. 781–786. <https://doi.org/10.1134/S0016793207060126>.
 25. Andreev A.A., Schirrmeyer L., Tarasov P.E., Ganopolski A., Brovkin V., Siebert C., Wetterich S., Hubberten H.-W. Vegetation and climate history in the Laptev Sea region (Arctic Siberia) during Late Quaternary inferred from pollen records. *Quat. Sci. Rev.*, 2011, vol. 30, nos. 17–18, pp. 2182–2199. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.12.026>.

Для цитирования: Элькина Д.В., Гусев Е.А., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Костромина Н.А., Новихина Е.С., Гостенина А.А., Яржембовский Я.Д., Пискарев А.Л., Крылов А.А., Ованесян Г.И., Жамойда В.А. Первые результаты комплексных исследований, включая палеомагнитные, колонок донных осадков из Восточно-Сибирского моря // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 646–663. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.646-663>.

For citation: Elkina D.V., Gusev E.A., Ryabchuk D.V., Sergeev A.Yu., Kostromina N.A., Novikhina E.S., Gostenina A.A., Yarzhembovsky Ya.D., Piskarev A.L., Krylov A.A., Ovanesyan G.I., Zhamoida V.A. First results of the comprehensive analysis, including the paleomagnetic studies, of sediment cores from the East Siberian Sea. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 646–663. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.646-663>. (In Russian)

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 550.93+551.736+621.039.86

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.664-687

**ПОЗДНЕКУНГУРСКИЙ РАДИОИЗОТОПНЫЙ ВОЗРАСТ
ГРАНИЦЫ МЕЖДУ БАЛАХОНСКОЙ И КОЛЬЧУГИНСКОЙ
СЕРИЯМИ КУЗНЕЦКОГО БАССЕЙНА (ЗАПАДНАЯ
СИБИРЬ, РОССИЯ) – ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ВАЛИДНОСТИ УФИМСКОГО ЯРУСА
ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ШКАЛЫ ПЕРМСКОЙ СИСТЕМЫ**

*В.В. Силантьев^{1,2}, Я.М. Гутак^{1,3}, М. Тихомирова⁴, А. Кесснер⁴,
Л.Г. Пороховниченко^{1,5}, Е.В. Карасев^{1,6}, А.С. Фелькер^{1,6}, М.Н. Уразаева¹,
В.В. Жаринова¹*

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

²Филиал Казанского (Приволжского) федерального университета в городе Джизак,
г. Джизак, 130000, Республика Узбекистан

³Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, 654007, Россия

⁴Технический университет Фрайбергской горной академии,
г. Фрайберг, 09599, Германия

⁵Томский государственный университет, г. Томск, 634050, Россия

⁶Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, г. Москва, 117997, Россия

Аннотация

В статье обсуждается позднекунгурский радиоизотопный возраст (276.9 ± 0.4 млн лет) средней части старокузнецкой свиты (кузнецкая подсерия, кольчугинская серия) Кузнецкого бассейна, полученный высокоточным методом термической ионизационной масс-спектрометрии с разбавлением изотопов и химическим истиранием (Chemical-Abrasion Isotope-Dilution Thermal Ionisation Mass Spectrometry, CA-ID-TIMS). Анализ биостратиграфических данных подтвердил принадлежность датированного уровня интервалу, в котором балахонская (кордаитовая) флора сменяется кольчугинской (папоротниково-птеридоспермо-кордаитовой) флорой. Таким образом, сделан вывод о том, что смена балахонской флоры на кольчугинскую в низких широтах Ангариды произошла в позднем кунгуре. Полученные данные дают возможность напрямую сопоставить нижнюю часть кольчугинской серии с верхним кунгуром Международной хроностратиграфической шкалы. Сходные последовательности сообществ неморских двустворок в пермских разрезах Ангариды (гигантские *Prokopievskia*, *Khosedaela-Redikorella-Palaeomutela*, доминирующие *Palaeomutela*) и Восточной Европы (гигантские *Sinomya*, *Palaeomutela-Khosedaela-Redikorella*, доминирующие *Palaeomutela*) подтверждают обоснованность корреляции кузнецкой подсерии с уфимским ярусом. Положение нижней границы кольчугинской группы в верхней половине кунгурского яруса Международной хроностратиграфической шкалы ставит вопрос о сохранении уфимского яруса в качестве самостоятельного стратона в Общей стратиграфической шкале России. Нижняя его граница совпадает с началом смены балахонской и кольчугинской флор в низких широтах Ангариды, а также с фаунистическими обменами еврамерийских и ангарских сообществ неморских двустворок.

Ключевые слова: Кузнецкий бассейн, туфовые прослои, U-Pb-датирование, геохронология, биостратиграфия.

Введение

Радиоизотопное уран-свинцовое (U-Pb) датирование возраста зерен циркона с использованием метода термической ионизационной масс-спектрометрии с разбавлением изотопов и химическим истиранием (Chemical-Abrasion Isotope-Dilution Thermal Ionisation Mass Spectrometry, CA-ID-TIMS) является эффективным инструментом детальной стратиграфии. Радиоизотопные датировки позволили провести прямую корреляцию с Международной хроностратиграфической шкалой палеозойских угольных бассейнов Австралии, Китая, Восточной Европы, Северной и Южной Америки, Западной Европы. В данной статье представлены результаты продолжающихся исследований радиоизотопного CA-ID-TIMS датирования отложений Кузнецкого бассейна, начатого несколько лет назад [1–3].

Кузнецкий бассейн (Кузбасс), один из крупнейших угольных бассейнов Сибири (рис. 1), представлял собой в позднем палеозое гигантский предгорный прогиб, примыкавший с юга к Сибирской платформе. С востока и юга он был ограничен каледонидами Кузнецкого Алатау и Горной Шории, на западе и севере контактировал с еще подвижными герцинскими поясами Салаира и Колывань-Томской зоны [4, 5]. В настоящее время Кузбасс рассматривается как часть Алтае-Саянского складчатого пояса (рис. 1, *a* и *b*).

Близкое расположение Кузбасса и Сибирской платформы явилось причиной сходства их биоты. Своеобразие во многом эндемичных фаунистических и флористических сообществ этой обширной территории было использовано для выделения позднепалеозойской палеофлористической и палеозоологической области, получившей название Ангарская или, позднее, Ангарида [6–9]. В то же время ряд данных по палеобиогеографии конхострак, неморских остракод, неморских двустворчатых моллюсков и рыб указывает на вероятные фаунистические обмены между Ангаридой, Еврамерикой и Гондваной [10–14].

Высокая степень палеонтологической и палеоботанической изученности делает Кузбасс ключевым регионом при изучении стратиграфии всей Ангарида [9, 10]. Региональная стратиграфическая схема верхнего палеозоя Кузбасса [15, 16] является основой геологического картирования (рис. 1, *в*) и внутрирегиональных корреляций [9, 10, 17, 18]. Несмотря на детальность, верхнепалеозойские отложения Кузбасса не коррелируют напрямую ни с Общей стратиграфической шкалой России [19], ни с Международной хроностратиграфической схемой [20] (рис. 2). Невозможность прямой корреляции связана с отсутствием морской фауны (конодонтов, аммоноидей, фузулинид и др.) и значительным эндемизмом континентальной биоты Ангарида, обусловленным ее изоляцией от Еврамерики и Тетиса [8, 9, 13].

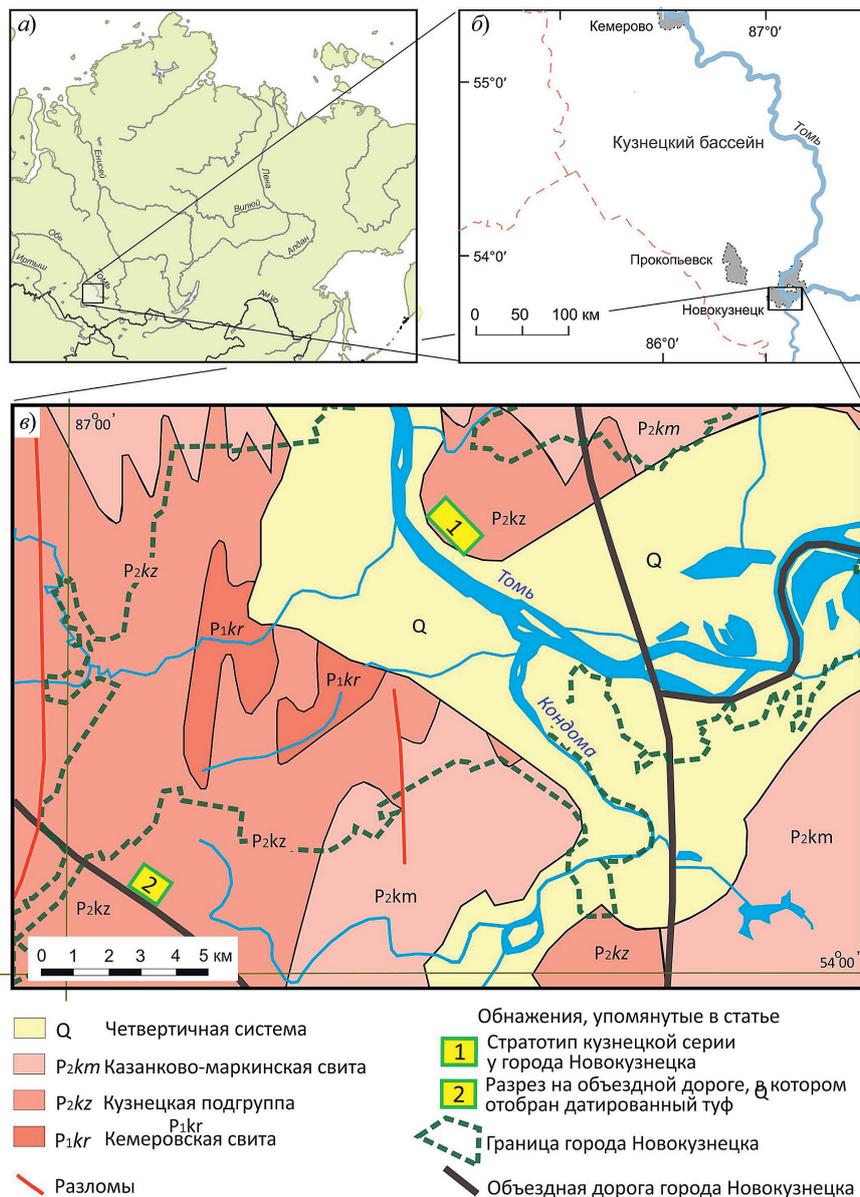


Рис. 1. Расположение изученных разрезов: а) на обзорной карте; б) в пределах Кузнецкого бассейна; в) на геологической карте. Точки с номерами: (1) стратотипический разрез кузнецкой подсерии и старокузнецкой свиты в черте г. Новокузнецка; (2) разрез старокузнецкой свиты на объездной дороге г. Новокузнецка, откуда датирован вулканический туф (по работе [3] с изменением)

Угленосная толща Кузбасса подразделяется на две серии – балахонскую и кольчугинскую, которые стратифицируются на подсерии, свиты и слои (рис. 2). Граница между балахонской и кольчугинской сериями традиционно соответствовала верхней границе нижней перми [10] или, в последнее время, границе приуральского и гваделупского (биармийского) отделов. Биостратиграфическое обоснование этого рубежа основывалось на смене «раннепермской» балахонской флоры «среднепермской» кольчугинской флорой. Смена балахонской и кольчугинской флоры прослежена на

всей территории Ангариды, и долгое время считалось, что она маркирует границу между ранней и средней пермью [21]. Новая CA-ID-TIMS датировка [3] сдвинула смену балахонской/кольчугинской флоры в поздний кунгур (рис. 2), так как датированный прослой вулканического туфа, отобран из середины старокузнецкой свиты (рис. 2–4), как раз из того интервала, где балахонская флора постепенно сменяется кольчугинской. Таким образом, новый радиоизотопный возраст (276.9 ± 0.4 млн лет) позволил напрямую сопоставить нижнюю часть кольчугинской серии с верхним кунгуром Международной хроностратиграфической шкалы [20].

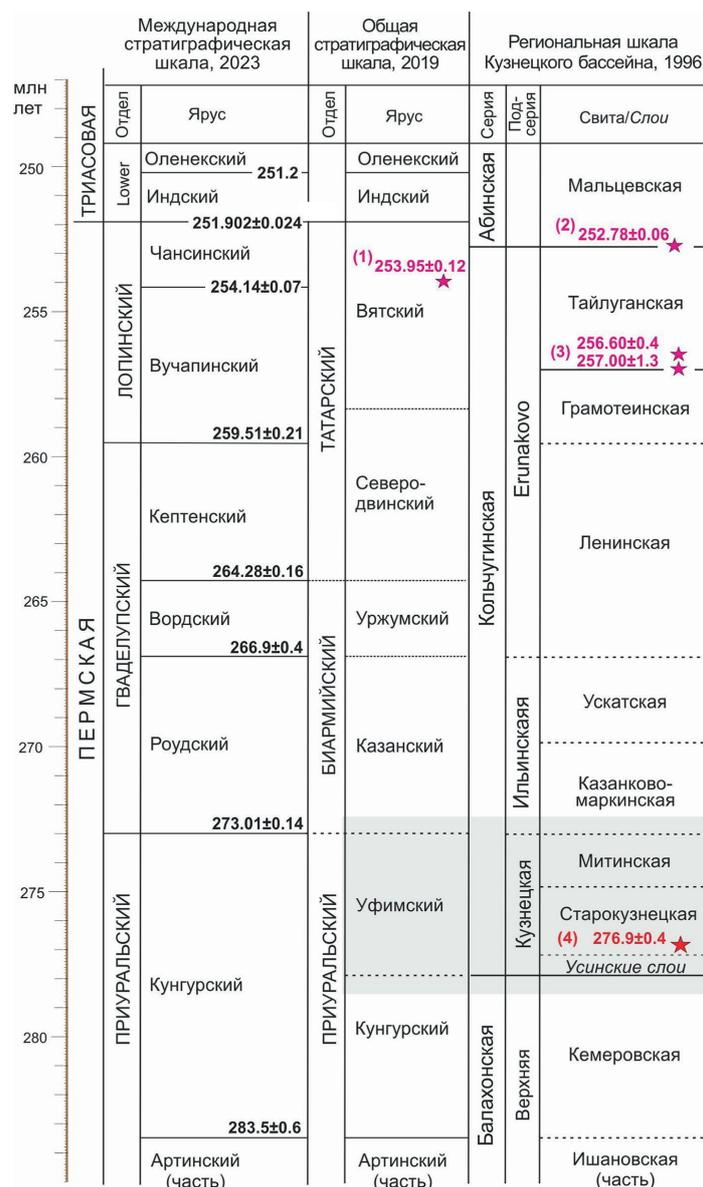


Рис. 2. Региональная стратиграфическая шкала пермских отложений Кузбасса и ее сопоставление с Общей стратиграфической шкалой России [19] и Международной хроностратиграфической схемой [20]; пунктирные линии – условная корреляция; звездочки – радиоизотопные датировки: (1) по работе [22]; (2) по работе [2]; (3) по работе [2]; (4) по работе [3]. Рассматриваемый интервал выделен серым цветом

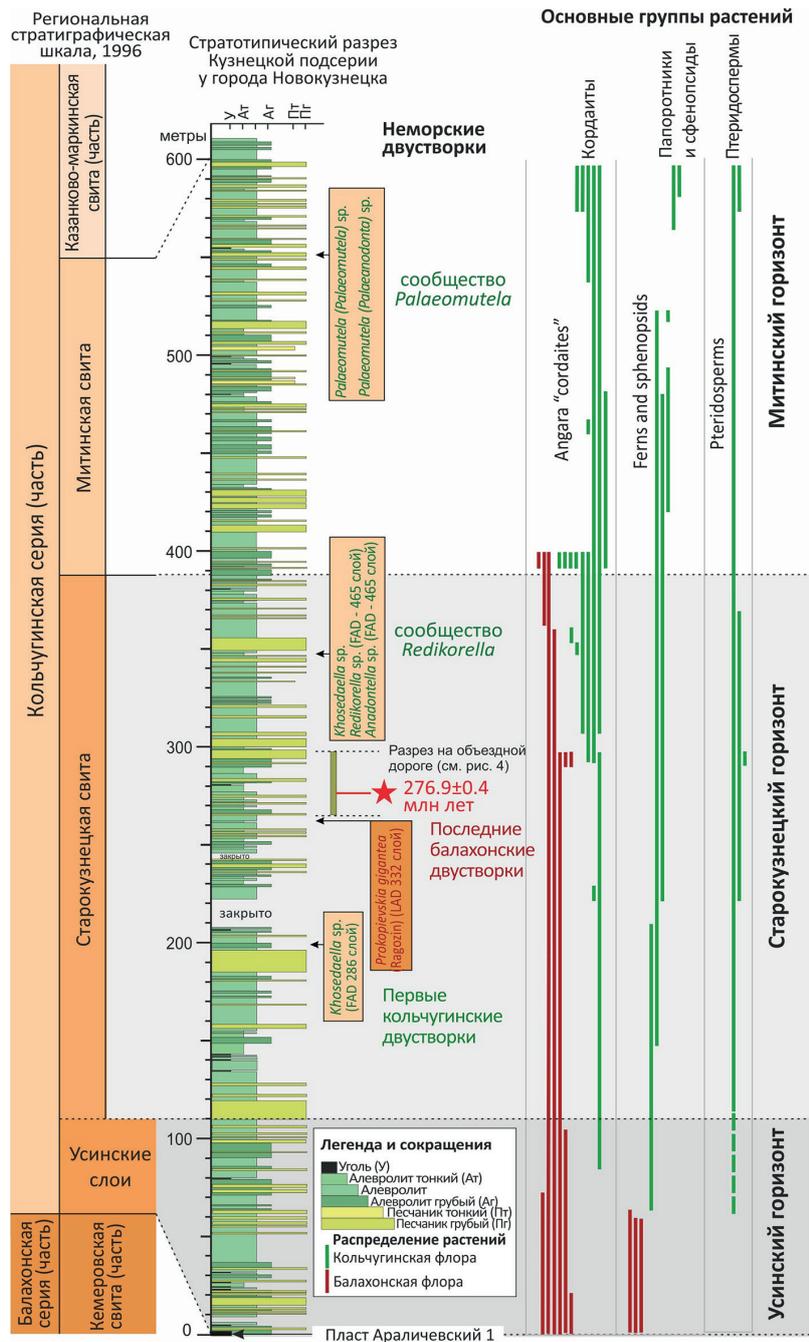


Рис. 3. Опорный разрез кузнецкой подсерии в стратотипе у г. Новокузнецка и стратиграфическое положение разреза с датированным пепловым слоем. Показаны основные биотические события сообществ неморских двустворок и растений (по работе [3] с упрощением)

В данной работе была поставлена цель – представить дополнительное обоснование валидности уфимского яруса Восточно-Европейской шкалы пермской системы на основе новых радиоизотопных и биостратиграфических данных. Задачи исследования включали: 1) анализ радиоизотопных данных [3]; 2) анализ стратигра-

фических данных, подтверждающих принадлежность датированного уровня интервалу смены балахонской и кольчугинской флоры; 3) сравнение последовательностей сообществ неморских двустворок в разрезах Ангариды и Восточной Европы, верифицирующих обоснованность корреляции кузнецкой подсерии с уфимским ярусом.

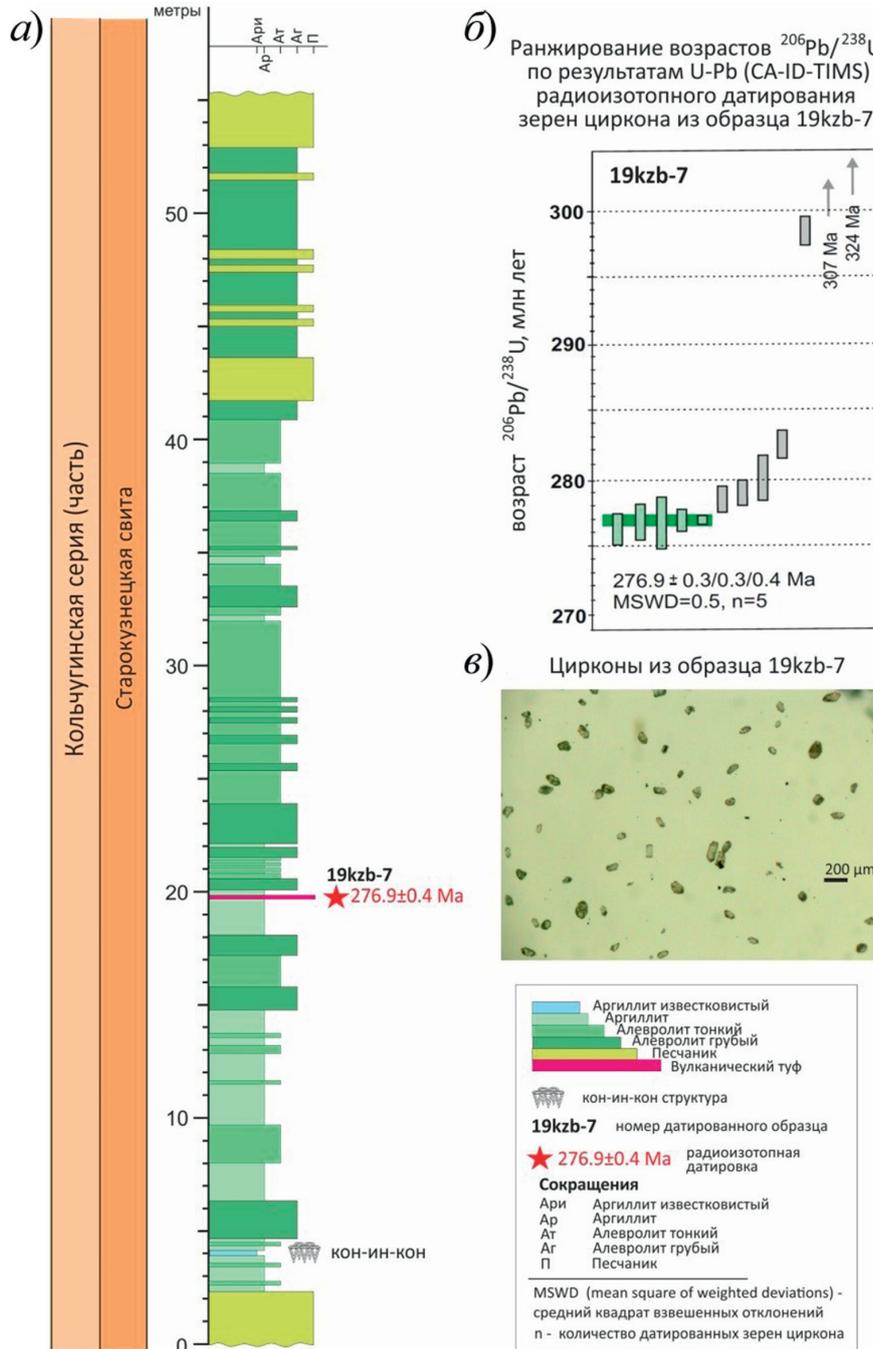


Рис. 4. Стратиграфическое положение датированного пеплового слоя (образец 19kzb-7) и полученные результаты: *а)* разрез старокузнецкой свиты на объездной дороге г. Новокузнецка; *б)* ранговый график возрастов $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (CA-ID-TIMS) по отдельным зернам циркона (по [3]); *в)* фотографии зерен циркона

1. Геологическое строение

Граница балахонской и кольчугинской серий принимается по смене угленосного интервала с мощными рабочими угольными пластами (верхняя подсерия балахонской серии) безугольными обломочными породами (нижняя часть кольчугинской серии) [16]. Биостратиграфическим обоснованием этого рубежа является смена балахонской флоры кольчугинской. Эта смена прослежена по всей Ангариде и считается, что ей соответствует граница между нижней (приуральский отдел) и средней (гваделупский отдел) пермью.

Балахонская серия представлена обломочными и угленосными отложениями (1300–3200 м) позднекаменноугольного (нижнебалахонская подсерия) и раннепермского (верхнебалахонская подсерия) возраста. Верхнебалахонская подсерия (700–2000 м) состоит из трех свит, разрез которых завершает кемеровская свита (рис. 2). Ниже приведены основные особенности интервала границы балахонской и кольчугинской серий.

Кемеровская свита (175–530 м) включает песчаники, алевролиты и аргиллиты с мощными рабочими пластами угля. Эталонный разрез обнажен на берегах реки Томь, в районе г. Кемерово. Свита распространена на всей территории Кузбасса и в прилегающих бассейнах Алтае-Саянского складчатого пояса.

Кемеровский горизонт соответствует кемеровской свите и обоснован особенностями таксономического состава ископаемых растений и беспозвоночных. Растительное сообщество включает членистостебельные, папоротники, кордаиты *Ruffloria* с узкими устьичными желобками, более редкие листья *Cordaites*, чешуевидные листья *Nephropsis*, многочисленные семена *Samaropsis*, *Carpolithus*, *Sylvella* и *Skokia* [10, 23].

Неморские двустворки включают «гигантские» формы родов *Prokopievskia Ragozin*, *Sinomya Betekhtina* и *Ussiella Betekhtina*. Гигантские раковины двустворок единичны в нижней части Кемеровской свиты и становятся более многочисленными в ее верхней части [10]. Скопления «гигантских» двустворок *Prokopievskia*, *Ussiella*, *Sinomya* широко распространены в верхнем кунгуре Тунгусского бассейна (верхнебургу克林ская подсвита) [10], Восточного Таймыра (соколиная свита) и Тимано-Печорской платформы (лекворкутская свита) [11]. Маркирующие флористические слои с листостебельными мхами *Salairia longifolia*, членистостебельными *Paracalamites angustus*, войновские *Vojnovskya minima* и многочисленные семенами *Skokia*, характерными для верхней части кемеровского горизонта, прослежены по всему Кузбассу и прилегающим территориям [10, 23].

Кольчугинская серия (до 6000 м), как считалось ранее, примерно соответствует гваделупскому (среднему) и лопинскому (верхнему) отделам пермской системы (рис. 2). Нижняя граница серии принята в кровле верхнего рабочего угольного пласта (Араличевский I) балахонской серии.

Кузнецкая подсерия является нижней единицей Кольчугинской серии и не содержит рабочих угольных пластов (рис. 2–4). Стратотип подсерии обнажается на реке Томь в районе г. Новокузнецка (рис. 1, в). Подсерия (700–930 м) состоит из песчаников и алевролитов с прослоями аргиллитов, мергелей и сидеритов и включает (снизу вверх) усинские слои, старокузнецкую и митинскую свиты [16].

Усинские слои (70–110 м) состоят в основном из алевролитов, переслаивающихся с пакетами мелкозернистых песчаников, редкими прослоями аргиллитов и пластами карбонатных конкреций (рис. 4). Нижняя граница совпадает с границей подсерии [16].

Растительное сообщество усинских слоев отличается преобладанием членистостебельных и кордаитов [10]. Первое появление плохо сохранившихся листьев каллиптерид (например, птеридоспермы рода *Comia*) также характерно для усинских отложений (рис. 3). Важной особенностью является совместное присутствие балахонских и кольчугинских видов кордаитов и птеридоспермов. Это свидетельствует о том, что поздняя балахонская флора начинает постепенно замещаться ранней кольчугинской флорой. Неморские двустворчатые моллюски усинских отложений сходны с позднебалахонской фауной кемеровской свиты и включают «гигантские» раковины родов *Prokopievskia*, *Sinomya* и *Ussiella*.

Старокузнецкая свита (280–325 м) состоит из переслаивающихся пачек серых мелкозернистых и алевроитовых песчаников, алевролитов и аргиллитов, включающих многочисленные прослои и линзы сидеритовых и фосфоритовых конкреций, а также тонкие единичные прослои туффитов. Нижняя граница свиты принята на уровне 110 м выше кровли угольного пласта Араличевский I. Образец датированного пеплового туфа (образец 19kzb-7) отобран примерно в средней части старокузнецкой свиты, в верхней части одного из интервалов аргиллитов (рис. 3, 4).

Растительное сообщество характеризуется сосуществованием позднебалахонских и раннекольчугинских видов кордаитов, членистостебельных, птеридоспермов, папоротников, листостебельных мхов и семян. Кордаиты представлены в основном родами *Cordaites* и *Ruffloria*, причем первые доминируют [10]. В качестве корреляционного маркера используются слои с перистыми листьями впервые появившегося птеридосперма *Comia osinovskiensis* Gorelova, которые прослежены в пределах Кузбасса и прилегающих бассейнов.

Сообщество неморских двустворок очень сходно с двустворками кемеровской свиты и включает реликтовые виды позднебалахонской фауны *Ussiella* (= *Mrassiella*) *gigantissima* (Khalf.), *U. ussiensis* (Khalf.), *Prokopievskia gigantea* Rag. и др. Большинство новых таксонов, впервые появляющихся в этой свите, а именно, роды *Augea*, *Zvonarevia*, *Bunguria* – преимущественно эндемичны и филогенетически связаны с балахонской фауной. Наибольший интерес представляет первое появление в старокузнецкой свите космополитного рода *Redikorella* Silantiev, 1994. Этот род широко распространен в соликамской свите Восточно-Европейской платформы и Приуралья, в интинской свите Тимано-Печорской платформы, в верхней части бургуклинского горизонта Тунгусского бассейна [11], а недавно обнаружен в отложениях кунгурского возраста Южных Альп [24].

Митинская свита (280–380 м) состоит из мелкозернистых песчаников, переслаивающихся с пачками алевролитов и аргиллитов, содержащих пласты карбонатных конкреций и редкие прослои туффитов. В опорном разрезе нижняя граница свиты условно проводится на отметке 390–420 м выше кровли угольного пласта Араличевский I (рис. 3).

Растительное сообщество митинской свиты представляет собой новый этап в эволюции папоротниково-птеридоспермово-кордаитовой флоры Ангариды и соответствует типичной кольчугинской флоре, лишенной позднебалахонских элементов [10]. Маркирующий флористический слой с птеридоспермами *Permocallipteris ivancevia* (Gorelova) Naugolnykh прослеживается на всей территории Кузбасса (митинский горизонт) и Тунгусского бассейна (нижнепелятчинский горизонт) [10]. Неморские двустворки представлены как родами, широко распространенными на всей территории Ангариды, включая Тунгусский бас-

сейн и Тимано-Печорскую платформу (*Khosedaela*, *Brussiella*), так и космополитными родами (*Redikorella*, *Palaeomutela*).

Вулканогенный материал в угленосных отложениях Кузбасса распространен повсеместно. Описано не менее 12 вулканогенных прослоев (от первых см до 10 м) туфов, тонштейнов и вулканических пеплов [25–29]. Большинство тонштейнов и вулканических пеплов содержат идиоморфные зерна циркона, происхождение которых связывают с выпадением из пеплового облака, образовавшегося при вулканических извержениях, синхронных с накоплением обломочных или торфяных осадков. Поиск и изучение прослоев вулканического материала позволяет разработать хроностратиграфическую основу стратиграфии угленосных отложений Кузбасса на основе радиоизотопного датирования цирконов [1–3].

2. Материал

Разрез, из которого был отобран вулканический туф, послуживший материалом для выделения зерен циркона и их радиоизотопного датирования (образец 19kzb-7) [3], расположен вблизи южной границы г. Новокузнецка во врезе объездной дороги (53.711694 с. ш., 86.957161 в. д.) (рис. 3, в, разрез 2). Пласты падают к северу под углом 60° (рис. 5, а). Тонкая цикличность разреза обусловлена регулярно повторяющимися аргиллитами, мелко- и крупнозернистыми алевролитами и песчаниками. Линзы и прослои карбонатных стяжений подчеркивают цикличность разреза (рис. 5, б). Слой вулканического пепла имеет более светлый цвет, чем вмещающие породы, и хорошо виден в стенке обнажения (рис. 5, в).

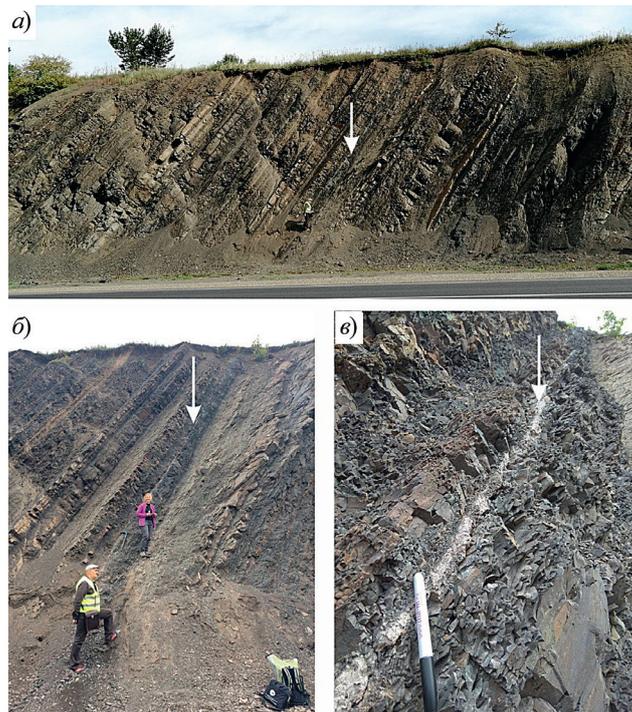


Рис. 5. Расположение прослоя вулканического туфа (образец 19kzb-7, белая стрелка) в средней части старокузнецкой свиты в обнажении на объездной дороге у г. Новокузнецка: а) общий вид обнажения; б) мелкая цикличность разреза; в) слой вулканического туфа (по работе [3])

Стратиграфическое положение датированного образца в старокузнецкой свите показано на рис. 3 и 4. Масса обработанного образца составила около 3 кг.

Характеристика циркона. Зерна циркона из пробы 19kzb-7 очень мелкие (около 100 мкм). Многие из них имеют округлые поверхности. Для проведения датирования нами были отобраны зерна циркона с ровной поверхностью и острыми кристаллографическими гранями (идиоморфные зерна), чтобы избежать наличия в зернах ксенокритических древних ядер.

3. Методы

Образец туфа был обработан в Казанском федеральном университете. Наиболее перспективные зерна циркона были затем направлены в Лабораторию изотопной геохимии и геохронологии Института минералогии Технического университета Фрайбергской горной академии (Германия) для точного датирования методом CA-ID-TIMS.

Пробоподготовка. Выделение цирконов из туфов проводилось по трем стандартным методикам [3]. Вначале образец туфа обрабатывали диметилсульфоксидом до превращения в глинистую массу. Далее проводили ультразвуковое (25 кГц) диспергирование. Минеральную фракцию размером 30–250 мкм, полученную после промывания глины, разделяли по удельному весу в тяжелой жидкости GPS-V (водный раствор гетерополивольфрамата натрия) с максимальной плотностью 3.00 ± 0.05 г/мл. Отбор зерен циркона проводили с помощью микроскопа ZEISS Stemi DV4 (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Германия).

Датирование CA-ID-TIMS. Отобранные зерна циркона (около 50 зерен идиоморфной формы) были отожжены в течение 96 ч при 900 °С, а затем подвергнуты химическому выщелачиванию под давлением в течение 2 ч при 210 °С концентрированными HF и HNO₃ в кислотно-стойких армированных автоклавах Paar (Anton Paar GmbH, Австрия). Короткое время выщелачивания использовали во избежание растворения мелких зерен циркона. При выщелачивании растворяются кристаллические домены с сильными радиационными повреждениями, в которых, как предполагается, произошла посткристаллизационная потеря свинца [30].

После этого кислоту вместе с растворенным цирконовым материалом полностью удаляли пипеткой, а к оставшимся зернам и фрагментам циркона добавляли 3.5 н HNO₃ на 30 мин при 50 °С для удаления поверхностного свинца. Перед отбором отдельных фрагментов циркона проводили несколько циклов очистки водой в сочетании с многократной ультразвуковой обработкой. Единичные зерна и фрагменты циркона промывали 3.5 н HNO₃ и переносили в очищенные микрокапсулы с небольшой каплей этой кислоты и четырьмя каплями концентрированной HF. В пробы добавляли раствор трассера ²⁰⁵Pb-²³³U-²³⁵U-(ET535) (TU Bergakademie Freiberg) [31]. Для окончательного растворения микрокапсулы помещали в кислотно-стойкие сосуды Paar и нагревали под давлением до 200 °С в течение 48 ч, затем сушили при 130 °С и повторно растворяли в 6 н HCl в течение 24 ч при 200 °С для перевода их в хлориды. После повторной сушки пробы растворяли в десяти каплях 3.1 н HNO₃ и переносили в микроколонки для анионообменной одноколоночной хроматографии. Уран (U) и свинец (Pb) отделяли от остальной пробы методом анионообменной хроматографии с использо-

ванием HCl и H₂O. Затем фракцию, содержащая U и Pb, загружали на предварительно дегазированные ренийевые нити с каплей силикагеля [32] и измеряли на масс-спектрометре IsotopX Phoenix (Isotopx Ltd., Великобритания) с использованием ионного счетчика SEM Daly. Точность результатов датирования проверяли повторными измерениями цирконовых стандартов 91500 [33] и Temora 2 [34].

4. Результаты и их обсуждение

Результаты радиоизотопного U-Pb анализа цирконов методом CA-ID-TIMS представлены в виде графиков ранжированного возраста ²⁰⁶Pb/²³⁸U на рис. 4, б. Средний возраст проб, соответствующий возрасту кристаллизации зерен циркона, рассчитывали по установленным возрастным кластерам с помощью программы ET Redux [35]. Погрешность средневзвешенных возрастов определяется как $\pm x/y/z$, где x – внутренняя ошибка измерения 2σ , y – внутренняя ошибка 2σ плюс погрешность калибровки трассера, а z – дополнительно включает неопределенность константы распада [36]. Для конечного результата использована z -погрешность, которая включает внутреннюю ошибку измерения 2σ , погрешность калибровки трассера и неопределенность константы распада и позволяет сравнивать полученный возраст с возрастными, полученными другими методами датирования [36]. Для образца 19kzb-7 даже короткая (2 ч) химическая абразия удалила более 50% отобранных зерен циркона, так что остались только очень мелкие фрагменты циркона. Нам удалось датировать 12 таких фрагментов. Возраст отдельных цирконов варьирует от 276 до 324 млн лет и имеет высокую погрешность измерений из-за малого размера фрагментов циркона. Пять измерений (зерна 1, 8, 9, 11, 13) образуют кластер с идентичными возрастными в интервале 276.2–277.0 млн лет. По этим пяти измерениям рассчитан средневзвешенный возраст 276.9 ± 0.4 млн лет (средний квадрат взвешенных отклонений составляет 0.5) [3]. Все остальные фрагменты циркона имеют более древний возраст, представляя собой унаследованные компоненты.

Новая датировка пеплового туфа из средней части старокузнецкой свиты указывает на позднекунгурский возраст интервала, в котором позднебалахонская (кордаитовая) флора сменяется кольчугинской (папоротниково-птеридоспермо-кордаитовой) флорой (рис. 3, 4).

Новые высокоточные радиоизотопные данные (276.9 ± 0.4 млн лет) определяют возраст средней части старокузнецкой свиты и впервые прямо указывают на принадлежность этого стратиграфического уровня к верхнему кунгuru Международной шкалы (рис. 2, 6). Старокузнецкая свита расположена выше основания кольчугинской серии, поэтому нижняя граница последней, совпадающая с подошвой усинских слоев, является несколько древнее новой радиоизотопной датировки, но также находится в верхнем кунгуре.

Согласно имеющимся биостратиграфическим данным, нижняя граница кольчугинской серии примерно соответствует нижней границе уфимского яруса Общей стратиграфической шкалы России. Пермский интервал этой шкалы традиционно основан на платформенных разрезах Европейской России [19].

Помимо Восточно-Европейской платформы, эта обширная территория включает Тимано-Печорскую платформу, которая в позднем палеозое входила в состав Ангариды. Фаунистические связи между континентальными бассейнами

Восточной Европой и Тимано-Печорской платформы, осуществлявшиеся через Предуральский прогиб, отражаются в сходстве временной последовательности сообществ неморских двустворчатых моллюсков. Это сходство позволяет соотнести нижнюю часть кольчугинской серии, а именно кузнецкую подсерию, с уфимским ярусом Европейской России [10, 11] (рис. 2, 6).

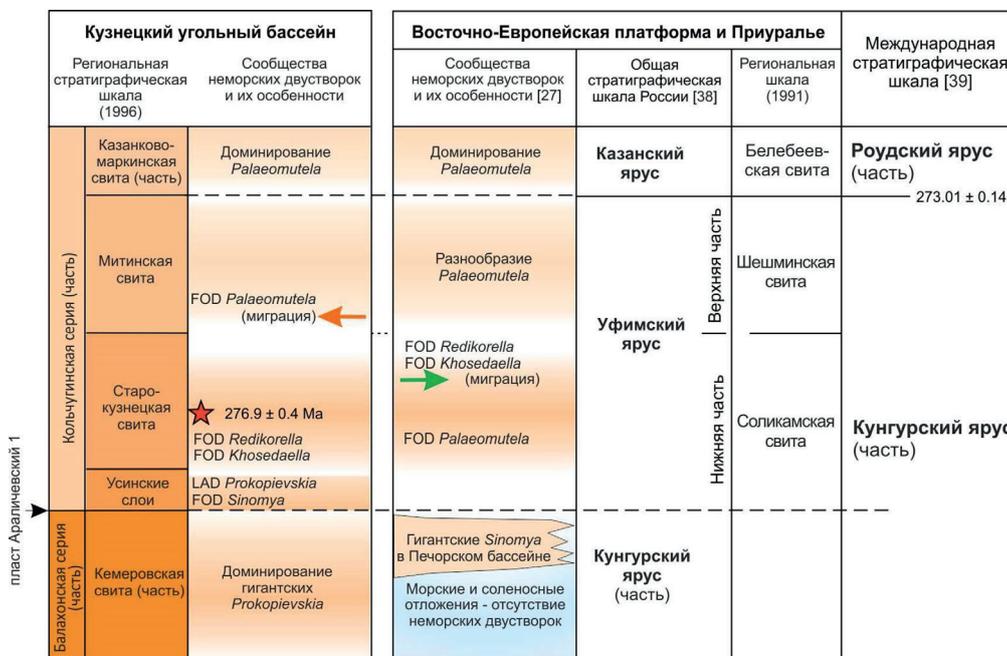


Рис. 6. Сопоставление кунгурско-роудского интервала Кузбасса и Восточной Европы; LAD (Last Appearance Datum) – данные о последнем появлении; FOD (First Occurrence Datum) – данные о первой встречаемости в пределах бассейна; оранжевая стрелка – миграция восточноевропейских родов неморских двустворчатых моллюсков в Ангариду; зеленая стрелка – миграция ангарских родов неморских двустворчатых моллюсков в Восточную Европу (по [3] с изменением)

До 2004 г., т. е. до принятия решения о трехчленном делении пермской системы, уфимский ярус Восточно-Европейской платформы и Предуральского прогиба имел международный статус, а его нижняя граница рассматривалась как глобальная граница между нижним и верхним отделами перми [37]. В пределах Кузбасса, как до 2004 г., так и в настоящее время, граница между нижним отделом перми и вышележащими отделами (верхняя пермь – до 2004 г., средняя пермь – после 2004 г.) принята в подошве кузнецкой подсерии [38]. Обще-признанным биотическим маркером этой границы считается смена балахонской флоры на кольчугинскую.

Смена позднебалахонской (кордаитовой) флоры кольчугинской (папоротниково-птеридоспермо-кордаитовой) происходит в стратиграфическом интервале, включающем усинские слои и старокузнецкую свиту. Эта смена прослеживается по всей Ангариде [39]. Кольчугинская флора более разнообразна в таксономическом отношении, чем позднебалахонская. Для нее характерна дальнейшая диверсификация птеридоспермов (*Comia*, *Compsopteris*, *Permocallipteris*, *Glottophyllum*) и папоротников (*Pecopteris*), появление новых видов семян

(*Tungussocarpus*, *Sylvella* и др.), изменения в морфологии листьев кордаитов. Листья кольчугинских кордаитов визуально более мелкие, с более густыми и толстыми жилками, обладают специфическими эпидермальными признаками – строением устьичных желобков, орнаментацией эпидермы и т. д. Эти признаки являются основанием для установления новых таксонов представителей родов *Cordaites* и *Ruffloria* [40, 41].

Увеличение таксономического разнообразия кольчугинской флоры и появление каллиптерид связывается с глобальным потеплением климата [42]. Изменение морфологии листьев кольчугинских кордаитов и уменьшение размеров членистостебельных согласуется с региональной аридизацией климата [43]. Анализ распределения видов в Кузнецкой подсерии (рис. 3) указывает на постепенное замещение позднебалахонской флоры кольчугинской. Возникновение новой кольчугинской флоры в Кузбассе фиксируется «переходными» растительными сообществами усинских слоев и старокузнецкой свиты, которые содержат смесь позднебалахонских и раннекольчугинских видов. Доминирующие растения митинской свиты – птеридоспермы, кордаиты и папоротники – состоят только из впервые появившихся кольчугинских видов, а балахонские виды заканчивают свое существование в митинской свите. Таким образом, возникновение кольчугинской флоры включает несколько событий: 1) первое появление кольчугинских элементов, 2) выраженная диверсификация кольчугинских таксонов и 3) полное замещение балахонской флоры кольчугинской.

Данные по неморским двустворкам подтверждают выводы о том, что на территории Кузбасса смена балахонской и кольчугинской флоры произошла в позднем кунгуре (рис. 6). В частности, в верхней части кунгурского яруса Тимано-Печорской платформы широко распространены гигантские двустворки рода *Sinomya*, морфологически сходного с кузбасскими гигантскими двустворками *Prokopievskia* [11]. Неморские двустворки родов *Khosedaella*, *Redikorella*, *Palaeomutela*, первое появление которых в Кузбассе ограничено кузнецкой подсерией, широко распространены в уфимском ярусе Восточно-Европейской части России и Приуралья. Примечателен обратный порядок появления этих родов в Кузбассе и Восточной Европе (рис. 6). В Кузбассе первыми в разрезе появляются *Khosedaella* и *Redikorella*, а затем *Palaeomutela*. В Восточной Европе, наоборот, в нижней части разреза сначала появляется *Palaeomutela*, а затем *Khosedaella* и *Redikorella*. Вероятно, миграция обусловила обратный порядок появления: род *Palaeomutela* мигрировал из Восточной Европы в Ангариду, а роды *Khosedaella* и *Redikorella* – из Ангариды в Восточную Европу.

Долгое время считалось, что центр происхождения *Redikorella* и *Palaeomutela* (последний включает два подрода: *P. (Palaeomutela)* и *P. (Palaeoanodonta)*) находился в Предуралье, откуда эти двустворки расселились в Ангариду, Катазию и Гондвану [11]. Недавние находки расширили представление о географической радиации *Redikorella* и *Palaeomutela*. Эти таксоны обнаружены в позднем кунгуре континентальных бассейнов западного Тетического сектора Варисцид, и это позволяет предположить, что центром происхождения обоих родов могут быть другие более южные районы [24].

Положение нижней границы кольчугинской серии в верхнем кунгуре Международной хроностратиграфической шкалы ставит вопрос о целесообразности выделения в его составе самостоятельного подразделения, соответствующего

уфимскому ярусу Европейской России. Нижняя граница этого подразделения примерно совпадает с началом смены балахонской флоры на кольчугинскую в низких широтах Ангариды (Кузбасс и смежные бассейны). Обоснованность выделения уфимского яруса в морских разрезах северной Евразии (Тимано-Печорская платформа, полуостров Канин, Верхоянье) обсуждалась в ряде публикаций [44, 45].

Наземные биотические события в Кузбассе в конце кунгура хорошо согласуются с региональной историей осадконакопления и глобальными климатическими изменениями. Кузнецкая подсерия, совпадающая со сменой балахонской и кольчугинской флор, характеризуется отсутствием угля. Это отсутствие, вероятно, связано с аридизацией регионального климата [42, 43] и глобальным потеплением климата во второй половине кунгура [46–48]. Глобальное повышение уровня моря в это время [49] косвенно подтверждается изменениями низкоширотных континентальных ландшафтов Ангариды, вызвавшими дифференциацию растительности, а также миграцией неморских двустворчатых моллюсков между Ангаридой и Восточной Европой (Еврамерикой).

Заключение

Новые радиоизотопные данные (276.9 ± 0.4 млн лет) [3] напрямую сопоставляют среднюю часть старокузнецкой свиты с верхним кунгуром Международной хроностратиграфической шкалы. Это свидетельствует о том, что смена балахонской флоры на кольчугинскую в низких широтах Ангариды (Кузбасс) произошла в позднем кунгуре.

Необходимо подчеркнуть, что позднекунгурский возраст старокузнецкой свиты, всей кузнецкой подсерии и смены балахонской флоры на кольчугинскую определяется, исходя из тех датировок ярусных границ, которые приняты в современной Международной хроностратиграфической шкале. При изменении этих датировок ярусная принадлежность рассматриваемых стратонов и событий может измениться. Российские палеоботаники традиционно рассматривают смену балахонской и кольчугинской флор как событие, отвечающее окончанию раннепермской эпохи. Возможно, в будущем эта точка зрения найдет подтверждение. Для этого необходимо продолжение радиоизотопного датирования отложений пермской системы. На глобальном уровне эти работы должны быть направлены на уточнение датировок нижней границы роудского яруса, на региональном уровне – на датирование пермских отложений Алтае-Саянского пояса, Сибирской платформы, Таймыра, Верхоянья, т. е. в первую очередь тех регионов, которые располагались рядом с подвижными тектоническими поясами позднего палеозоя.

Благодарности. Биостратиграфические исследования выполнены за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания проект № FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности.

Радиометрическое датирование проведено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10045, <https://rscf.ru/project/22-77-10045/>.

Литература

1. Davydov V.I., Karasev E.V., Nurgalieva N.G., Schmitz M.D., Budnikov I.V., Biakov A.S., Kuzina D.M., Silantiev V.V., Urazaeva M.N., Zharinova V.V., Zorina S.O., Gareev B.I., Vasilenko D.V. Climate and biotic evolution during the Permian-Triassic transition in the temperate Northern Hemisphere, Kuznetsk Basin, Siberia, Russia // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2021. V. 573. Art. 110432. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110432>.
2. Силантьев В.В., Гутак Я.М., Тихомирова М., Куликова А.В., Фелькер А.С., Уразаева М.Н., Пороховниченко Л.Г., Карасев Е.В., Бакаев А.С., Жаринова В.В., Наумчева М.А. Первые радиометрические датировки тонштейнов из угленосных отложений Кузнецкого бассейна: U-Pb-геохронология тайлуганской свиты // *Георесурсы*. 2023. Т. 25, № 2. С. 203–227. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.2.15>.
3. Silantiev V.V., Gutak Ya.M., Tichomirowa M., Käßner A., Kutugin R.V., Porokhovnichenko L.G., Karasev E.V., Felker A.S., Bakaev A.S., Naumcheva M.A., Urazaeva M.N., Zharinova V.V. Radioisotopic U-Pb dating of the Kolchugino Group basement (Kuznetsk Coal Basin, Siberia): Was the change of Early-Middle Permian Floras simultaneous at different latitudes in Angaraland? // *Preprints*. 2023. 2023111292. <https://doi.org/10.20944/preprints202311.1292.v1>.
4. Buslov M.M., Watanabe T., Fujiwara Y., Iwata K., Smirnova L.V., Safonova I.Y., Semakov N.N., Kiryanova A.P. Late Paleozoic faults of the Altai region, Central Asia: Tectonic pattern and model of formation // *J. Asian Earth Sci.* 2004. V. 23, No 5. P. 655–671. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00131-7](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00131-7).
5. Гутак Я.М. Становление структуры западной части Алтае-Саянской складчатой области (мезозойский этап) // *Геосферные исследования*. 2021. № 1. С. 123–129. <https://doi.org/10.17223/25421379/18/10>.
6. Meyen S.V. The Carboniferous and Permian floras of Angaraland (a synthesis) // *Biol. Mem.* 1982. V. 7, No 1. P. 1–109.
7. Meyen S.V. Carboniferous and Permian floras of the Angarida (review) // Meyen S.V. (Ed.) *Theoretical problems of paleobotany*. М.: Nauka, 1990. P. 131–223.
8. Meyen S.V., Afanasieva G.A., Betekhtina O.A., Durante M.V., Ganelin V.G., Gorelova S.G., Graizer M.I., Kotlyar G.V., Maximova S.V., Tschernjak G.E., Yuzvitsky A.Z. Angara and surrounding marine basins // Diaz C.M., Wagner R.H., Winkler Prins C.F., Granados L.F. (Eds.) *The Carboniferous of the World. III. The Former USSR, Mongolia, Middle Eastern Platform, Afganistan & Iran*. Madrid: I.T.G.M.E.; Leiden: N.N.M., 1996. P. 180–237.
9. Кузбасс – ключевой район в стратиграфии верхнего палеозоя Ангариды / под ред. И.В. Будникова. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1996. Т. 1. 122 с.; Т. 2. 109 с.
10. Бетехтина О.А., Горелова С.Г., Дрягина Л.Л., Данилов В.И., Батяева С.П., Токарева П.А. Верхний палеозой Ангариды. Новосибирск: Наука, 1988. 264 с.
11. Silantiev V.V. Permian nonmarine bivalve mollusks: Review of geographical and stratigraphic distribution // *Paleontol. J.* 2018. V. 52, No 7. P. 707–729. <https://doi.org/10.1134/S0031030118070092>.
12. Silantiev V.V., Chandra S., Urazaeva M.N. Systematics of nonmarine bivalve mollusks from the Indian Gondwana Coal Measures (Damuda Group, Permian, India) // *Paleontol. J.* 2015. V. 49, No 12. P. 1235–1274. <https://doi.org/10.1134/s0031030115120114>.
13. Amler M.R.W., Silantiev V.V. A global review of Carboniferous marine and non-marine bivalve biostratigraphy // *Spec. Publ. – Geol. Soc. London*. 2022. V. 512, No 1. P. 893–932. <https://doi.org/10.1144/sp512-2021-101>.

14. *Bakaev A.S., Kogan I.* A new species of *Burguklia* (Pisces, Actinopterygii) from the Middle Permian of the Volga Region (European Russia) // *PalZ.* 2020. V. 94. P. 93–106. <https://doi.org/10.1007/s12542-019-00487-6>.
15. Решения Всесоюзного совещания по разработке унифицированных стратиграфических схем докембрия, палеозоя и четвертичной системы Средней Сибири (1979 г.). Часть 2 (средний и верхний палеозой). Новосибирск: СНИИГГиМС, 1982. 129 с.
16. Решение совещания по стратиграфии верхнепалеозойских отложений Кузбасса // Кузбасс – ключевой район в стратиграфии верхнего палеозоя Ангариды / под ред. И.В. Будникова. Новосибирск: ЮжСибгеолком; ПССС «Интергео», 1996. Т. 2. С. 93–94.
17. *Кутыгин Р.В.* Пермские амmonoидеи семейства *Medlicottiidae* в Верхоянье // *Палеонтологический журнал.* 2020. Т. 54, № 6. С. 13–25. <https://doi.org/10.31857/S0031031X20060033>.
18. *Budnikov I.V., Kutygin R.V., Shi G.R., Sivtchikov V.E., Krivenko O.V.* Permian stratigraphy and paleogeography of Central Siberia (Angaraland) – A review // *J. Asian Earth Sci.* 2020. V. 196. Art. 104365. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2020.104365>.
19. Стратиграфический кодекс России (утвержден Бюро МСК 18 октября 2005 г.). СПб.: ВСЕГЕИ, 2019. 96 с.
20. International Chronostratigraphic Chart. URL: <https://stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2023-06.pdf>.
21. *Котляр Г.В., Пухонто С.К., Бураго В.И.* Межрегиональная корреляция континентальных и морских пермских отложений северо-востока России, юга Дальнего Востока, Сибири и печорского Приуралья // *Тихоокеанская геология.* 2018. Т. 37, № 1. С. 3–21.
22. *Davydov V.I., Arefiev M.P., Golubev V.K., Karasev E.V., Naumcheva M.A., Schmitz M.D., Silantiev V.V., Zharinova V.V.* Radioisotopic and biostratigraphic constraints on the classical Middle–Upper Permian succession and tetrapod fauna of the Moscow syncline, Russia // *Geology.* 2020. V. 48, No 7. P. 742–747. <https://doi.org/10.1130/G47172.1>.
23. *Вербицкая Н.Г.* Кузбасс – ключевой район в стратиграфии верхнего палеозоя Ангариды // Кузбасс – ключевой район в стратиграфии верхнего палеозоя Ангариды / под ред. И.В. Будникова. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1996. Т. 1. С. 115–120.
24. *Silantiev V., Marchetti L., Ronchi A., Schirolli P., Scholze F., Urazaeva M.* Permian non-marine bivalves from the Collio and Guncina formations (Southern Alps, Italy): revised biostratigraphy and palaeobiogeography // *Riv. Ital. Paleontol. Stratigr.* 2022. V. 128, No 1. P. 43–67. <https://doi.org/10.54103/2039-4942/17050>.
25. *Ван А.В., Казанский Ю.П.* Вулканический материал в осадках и осадочных породах. Новосибирск: Наука, 1985. 128 с.
26. *Черновьянц М.Г.* Тонштейны и их использование при изучении угленосных формаций. М.: Недра, 1992. 144 с.
27. *Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M., Ilenok S.S.* Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia) // *Int. J. Coal Geol.* 2011. V. 86, No 4. P. 318–328. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.03.005>.
28. *Arbuzov S.I., Spears D.A., Vergunov A.V., Ilenok S.S., Mezhibor A.M., Ivanov V.P., Zarubina N.A.* Geochemistry, mineralogy and genesis of rare metal (Nb-Ta-Zr-Hf-Y-REE-Ga) coals of the seam XI in the south of Kuznetsk Basin, Russia // *Ore Geol. Rev.* 2019. V. 113. Art. 103073. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103073>.
29. *Thompson L.N., Finkelman R.B., Arbuzov S.I., French D.H.* An unusual occurrence of ferroan magnesite in a tonstein from the Minusinsk Basin in Siberia, Russia // *Chem. Geol.* 2021. V. 568. Art. 120131. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120131>.

30. Mattinson J.M. Zircon U-Pb chemical abrasion (“CA-TIMS”) method: Combined annealing and multi-step partial dissolution analysis for improved precision and accuracy of zircon ages // *Chem. Geol.* 2005. V. 220, No 1–2. P. 47–66. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.03.011>.
31. Condon D.J., Schoene B., McLean N.M., Bowring S.A., Parrish R.R. Metrology and traceability of U–Pb isotope dilution geochronology (EARTHTIME Tracer Calibration Part I) // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2015. V. 164. P. 464–480. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.05.026>.
32. Gerstenberger H., Haase G. A highly effective emitter substance for mass spectrometric Pb isotope ratio determinations // *Chem. Geol.* 1997. V. 136, No 3–4. P. 309–312. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00033-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00033-2).
33. Wiedenbeck M., Allé P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., Von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses // *Geostand. Newsl.* 1995. V. 19, No 1. P. 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.1995.tb00147.x>.
34. Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundil R., Campbell I.H., Korsch R.J., Williams I.S., Foudoulis C. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element related matrix effect, SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards // *Chem. Geol.* 2004. V. 205, No 1–2. P. 115–140. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.01.003>.
35. Bowring J.F., McLean N.M., Bowring S.A. Engineering cyber infrastructure for U-Pb geochronology: Tripoli and U-Pb_Redux // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2011. V. 12, No 6. Art. Q0AA19. <https://doi.org/10.1029/2010GC003479>.
36. Будников И.В., Гриненко В.С., Клец А.Г., Кутыгин Р.В., Сивчиков В.Е. Модель формирования верхнепалеозойских отложений востока Сибирской платформы и ее складчатого обрамления (закономерности осадконакопления, районирование, корреляция) // *Отечеств. геология.* 2003. № 6. С. 86–92.
37. Котляр Г.В., Голубев В.К., Силантьев В.В. Общая стратиграфическая шкала пермской системы: современное состояние // *Общая стратиграфическая шкала России: состояние и перспективы обустройства.* М.: ГИН РАН, 2013. С. 187–195.
38. Гутак Я.М., Фелькер А.С., Силантьев В.В. Вулканические породы в разрезах пермской системы Кузбасса // *Геосферные исследования.* 2023. № 3. С. 52–57. <https://doi.org/10.17223/25421379/28/4>.
39. Дуранте М.В. Последовательность позднепалеозойских флористических комплексов Верхоянья // *Lethaea Rossica. Российский палеоботанический журнал.* 2010. Т. 2. С. 45–54.
40. Мейен С.В. Кордаитовые верхнего палеозоя Северной Евразии. М.: Наука, 1966. 184 с.
41. Глухова Л.В., Меньшикова Л.В. Микроструктура кордаитов из верхнепермских отложений Кузнецкого бассейна // *Палеонтол. журн.* 1980. № 3. С. 107–117.
42. Дуранте М.В. Реконструкция климатических изменений в позднем палеозое Ангариды (на основе фитогеографических данных) // *Стратиграфия. Геол. корреляция.* 1995. Т. 3, № 2. С. 25–37.
43. Горелова С.Г., Батяева С.К. Растения // *Верхний палеозой Ангариды / под ред. И.Т. Журавлевой, В.И. Ильиной.* Новосибирск: Наука, 1988. С. 71–80.
44. Grunt T.A. Late Permian of the Kanin Peninsula. Moscow: Nauka, 2006. 213 p.
45. Грунт Т.А. Проблема соотношения Общей пермской стратиграфической шкалы России с региональными шкалами и глобальным хроностратиграфическим стандар-

- том // Общая стратиграфическая шкала России: состояние и проблемы обустройства. Всероссийское совещание. Москва: ГИН РАН, 2013. С. 214–217.
46. *Chen B., Joachimski M.M., Shen S., Lambert L.L., Lai X., Wang X., Chen J., Yuan D.* Permian ice volume and palaeoclimate history: Oxygen isotope proxies revisited // *Gondwana Res.* 2013. V. 24, No 1. P. 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.07.007>.
47. *Davydov V.I.* Warm water benthic foraminifera document the Pennsylvanian–Permian warming and cooling events – the record from the Western Pangea tropical shelves // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2014. V. 414. P. 284–295. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.09.013>.
48. *Davydov V.I., Biakov A.S., Isbell J.L., Crowley J.L., Schmitz M.D., Vedernikov I.L.* Middle Permian U–Pb zircon ages of the “glacial” deposits of the Atkan Formation, Ayan-Yuryakh anticlinorium, Magadan province, NE Russia: Their significance for global climatic interpretations // *Gondwana Res.* 2016. V. 38. P. 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.10.014>.
49. *Rygel M.C., Fielding C.R., Frank T.D., Birgenheier L.P.* The magnitude of late Paleozoic glacioeustatic fluctuations: A synthesis // *J. Sediment. Res.* 2008. V. 78, No 8. P. 500–511. <https://doi.org/10.2110/jsr.2008.058>.

Поступила в редакцию 20.11.2023

Принята к публикации 08.12.2023

Силантьев Владимир Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующий кафедрой палеонтологии и стратиграфии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия

Филиал Казанского (Приволжского) федерального университета в городе Джизаке
ул. Шарофа Рашидова, д. 295, г. Джизак, 130000, Республика Узбекистан
E-mail: Vladimir.Silantiev@kpfu.ru

Гутак Ярослав Михайлович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии, геодезии и безопасности жизнедеятельности Института горного дела и геосистем; инженер Института геологии и нефтегазовых технологий

Сибирский государственный индустриальный университет
ул. Кирова, д. 42, г. Новокузнецк, 654007, Россия

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: gutakjaroslav@yandex.ru

Тихомирова Марион, доктор наук, заведующая лабораториями изотопной геохимии и геохронологии Института геологии

Технический университет Фрайбергской горной академии
Академиштрассе, д. 6, г. Фрайберг, 09599, Германия
E-mail: marion.tichomirowa@mineral.tu-freiberg.de

Кесснер Александра, кандидат наук, ассистент лаборатории изотопной геохимии и геохронологии Института геологии

Технический университет Фрайбергской горной академии
Академиштрассе, д. 6, г. Фрайберг, 09599, Германия
E-mail: alexandra.kaessner@mineral.tu-freiberg.de

Пороховниченко Любовь Георгиевна, кандидат геолого-минералогических наук, инженер-исследователь лаборатории микропалеонтологии; ведущий инженер Института геологии и нефтегазовых технологий

Томский государственный университет
пр. Ленина, д. 36, г. Томск, 634050, Россия

Казанский (Приволжский) федеральный университет

ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *plg@t-sk.ru*

Карасев Евгений Владимирович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории палеоботаники; старший научный сотрудник Института геологии и нефтегазовых технологий

Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН
ул. Профсоюзная, д. 123, г. Москва, 117997, Россия
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *karasev@paleo.ru*

Фелькер Анастасия Сергеевна, кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник лаборатории артропод; младший научный сотрудник Института геологии и нефтегазовых технологий

Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН
ул. Профсоюзная, д. 123, г. Москва, 117997, Россия
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *lab@palaeontomolog.ru*

Уразаева Миляуша Назимовна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры палеонтологии и стратиграфии Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *Milyausha.Urazaeva@kpfu.ru*

Жаринова Вероника Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель кафедры палеонтологии и стратиграфии Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *VeVZharinova@kpfu.ru*

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.664-687

Late Kungurian Radioisotope Age of the Boundary Between the Balakhonka and Kolchugino Groups in the Kuznetsk Basin (Western Siberia, Russia) – Additional Evidence for the Validity of the Ufimian Stage of the East European Permian

V.V. Silantiev^{a,b*}, Ya.M. Gutak^{a,c**}, M. Tichomirowa^{d***}, A. Käßner^{d****},
L.G. Porokhovnichenko^{a,e*****}, E.V. Karasev^{a,f*****}, A.S. Felker^{a,f*****},
M.N. Urazaeva^{a*****}, V.V. Zharinova^{a*****}

^aKazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

^bBranch of Kazan Federal University in the city of Jizzakh, Jizzakh, 130000 Republic of Uzbekistan

^cSiberian State Industrial University, Novokuznetsk, 654007 Russia

^dTechnische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, 09599 Germany

^eTomsk State University, Tomsk, 634050 Russia

^fBorissiak Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

E-mail: *Vladimir.Silantiev@kpfu.ru, **gutakjaroslav@yandex.ru,
marion.tichomirowa@mineral.tu-freiberg.de, *alexandra.kaessner@mineral.tu-freiberg.de,
*****plg@t-sk.ru, *****karasev@paleo.ru, *****lab@palaеontomolog.ru,
*****Milyausha.Urazaeva@kpfu.ru, *****VeVZharinova@kpfu.ru

Received November 20, 2023; Accepted December 8, 2023

Abstract

This article discusses the Late Kungurian radioisotopic age (276.9 ± 0.4 Ma) of the middle part of the Starokuznetsk Formation (Kuznetsk Subgroup, Kolchugino Group) of the Kuznetsk Basin determined by chemical abrasion–isotope dilution–thermal ionization mass spectrometry (CA-ID-TIMS). The analysis of the biostratigraphic data confirms that the layer dated belongs to the interval in which the Balakhonka Flora (cordaitoid) was replaced by the Kolchugino Flora (fern-pteridosperm-cordaitoid). This indicates that the change from the Balakhonka Flora to the Kolchugino Flora in the low latitudes of Angaraland took place during the Late Kungurian. The data obtained were used for direct correlation of the lower part of the Kolchugino Group with the Upper Kungurian of the International Chronostratigraphic Chart. Similar sequences of non-marine bivalve assemblages in the Permian successions of Angaraland (giant *Prokopievskia*, *Khosedaella-Redikorella-Palaeomutela*, and dominant *Palaeomutela*) and Eastern Europe (giant *Sinomya*, *Palaeomutela-Khosedaella-Redikorella*, and dominant *Palaeomutela*) further support the validity of the correlation of the Kuznetsk Subgroup with the Ufimian Stage. The placement of the lower boundary of the Kolchugino Group in the upper part of the Kungurian Stage of the International Chronostratigraphic Scale raises the question of the continuation of the Ufimian Stage as an independent straton in the East European Stratigraphic Scale. Its lower boundary coincides with the beginning of the change in the Balakhonka and Kolchugino Flora in the low latitudes of Angaraland, as well as with the faunal exchanges between the Euramerican and Angarian non-marine bivalve assemblages.

Keywords: Kuznetsk Basin, ash beds, U-PB dating, geochronology, biostratigraphy

Acknowledgements. Biostratigraphic studies were funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment in the sphere of scientific activities (project no. FZSM-2023-0023).

Radiometric dating was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-77-10045, <https://rscf.ru/project/22-77-10045/>).

Figure Captions

- Fig. 1. Location of the studied sections: *a*) overview map; *b*) Kuznetsk Basin; *c*) geological map. Numbered points: (1) the reference section of the Starokuznetsk Formation within the city of Novokuznetsk; (2) the section of the Starokuznetsk Formation located on the Novokuznetsk bypass road from where volcanic tuff was dated (according to [3], with modification).
- Fig. 2. The Regional Stratigraphic Scale of the Permian coal-bearing sediments of Kuzbass and its comparison with the General Stratigraphic Scale of Russia [19] and the International Chronostratigraphic Chart [20]; dotted lines – conditional correlation; asterisks – radiometric dating: (1) Davydov et al. [22]; (2) Davydov et al. [1]; (3) Silantiev et al. [2]; (4) Silantiev et al. [3]. The studied interval is highlighted in grey.
- Fig. 3. Reference section of the Kuznetsk Subgroup within the city of Novokuznetsk showing the stratigraphic position of the section with the dated ash bed. Generalised major biotic events of the non-marine bivalve and plant assemblages are shown (according to [3], with simplification).
- Fig. 4. Stratigraphic position of the dated ash bed (sample no. 19 kzb-7) and results obtained: *a*) the section of the Starokuznetsk Formation on the Novokuznetsk bypass road; *b*) ranking plot of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages (CA-ID-TIMS) for individual zircon grains (according to [3]); *c*) photographs of zircon grains.
- Fig. 5. Location of the volcanic ash bed (sample no. 19kzb-7; white arrow) in the middle part of the Starokuznetsk Formation in the outcrop on the bypass road near the city of Novokuznetsk: *a*) general view of the outcrop; *b*) fine cyclicity of the succession; *c*) the volcanic ash bed (according to [3]).
- Fig. 6. Comparison of the Kungurian-Middle Permian successions of the Kuzbass and Eastern Europe; LAD – last appearance datum; FOD – first occurrence datum within the Basin; orange arrow – migration of Eastern European non-marine bivalves to Angaraland; green arrow – migration of the Angarian non-marine bivalves to Eastern Europe (according [3], with modification).

References

- Davydov V.I., Karasev E.V., Nurgaliev N.G., Schmitz M.D., Budnikov I.V., Biakov A.S., Kuzina D.M., Silantiev V.V., Urazaeva M.N., Zharinova V.V., Zorina S.O., Gareev B.I., Vasilenko D.V. Climate and biotic evolution during the Permian-Triassic transition in the temperate Northern Hemisphere, Kuznetsk Basin, Siberia, Russia. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 2021, vol. 573, art. 110432. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110432>.
- Silantiev V.V., Gutak Ya.M., Tichomirowa M., Kulikova A.V., Felker A.S., Urazaeva M.N., Porokhovnichenko L.G., Karasev E.V., Bakaev A.S., Zharinova V.V., Naumcheva M.A. First radiometric dating of tonsteins from coal-bearing succession of the Kuznetsk Basin: U-Pb geochronology of the Tailugan Formation. *Georesursy*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 203–227. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.2.15>. (In Russian)
- Silantiev V.V., Gutak Ya.M., Tichomirowa M., Käßner A., Kutugin R.V., Porokhovnichenko L.G., Karasev E.V., Felker A.S., Bakaev A.S., Naumcheva M.A., Urazaeva M.N., Zharinova V.V. Radioisotopic U-Pb dating of the Kolchugino Group basement (Kuznetsk Coal Basin, Siberia): Was the change of Early-Middle Permian Floras simultaneous at different latitudes in Angaraland? *Preprints*, 2023, 2023111292. <https://doi.org/10.20944/preprints202311.1292.v1>.
- Buslov M.M., Watanabe T., Fujiwara Y., Iwata K., Smirnova L.V., Safonova I.Y., Semakov N.N., Kiryanova A.P. Late Paleozoic faults of the Altai region, Central Asia: Tectonic pattern and model of formation. *J. Asian Earth Sci.*, 2004, vol. 23, no. 5, pp. 655–671. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00131-7](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00131-7).
- Gutak Ya.M. Development of the structure of the west part of the Altay-Sayan orogen (the Mesozoic stage). *Geos. Issled.*, 2021, no. 1, pp. 123–129. <https://doi.org/10.17223/25421379/18/10>. (In Russian)
- Meyen S.V. The Carboniferous and Permian floras of Angaraland (a synthesis). *Biol. Mem.*, 1982, vol. 7, no. 1, pp. 1–109.
- Meyen S.V. Carboniferous and Permian floras of the Angarida (review). In: Meyen S.V. (Ed.) *Theoretical Problems of Paleobotany*. Moscow, Nauka, 1990. pp. 131–223.
- Meyen S.V., Afanasieva G.A., Betekhtina O.A., Durante M.V., Ganelin V.G., Gorelova S.G., Graizer M.I., Kotlyar G.V., Maximova S.V., Tschernjak G.E., Yuzvitsky A.Z. Angara and surround-

- ing marine basins. In: Diaz, C.M., Wagner, R.H., Winkler Prins, C.F., Granados, L.F. (Eds.) *The Carboniferous of the World. III. The Former USSR, Mongolia, Middle Eastern Platform, Afganistan & Iran*. Madrid, I.T.G.M.E.; Leiden, N.N.M., 1996, pp. 180–237.
9. Budnikov I.V. (Ed.) *Kuzbass – klyuchevoi raion v stratigrafii verkhnego paleozoya Angaridy* [Kuzbass as a Key Region for the Late Paleozoic Stratigraphy of Angarida]. Novosibirsk, SNIIGGiMS, 1996. Vol. 1, 122 p.; Vol. 2, 109 p. (In Russian)
 10. Betekhtina O.A., Gorelova S.G., Dryagina L.L., Danilov V.I., Batyaeva S.P., Tokareva P.A. *Verhnii paleozoi Angaridy* [Upper Paleozoic of Angarida]. Novosibirsk, Nauka, 1988. 264 p. (In Russian)
 11. Silantiev V.V. Permian nonmarine bivalve mollusks: Review of geographical and stratigraphic distribution. *Paleontol. J.*, 2018, vol. 52, no. 7, pp. 707–729. <https://doi.org/10.1134/S0031030118070092>.
 12. Silantiev V.V., Chandra S., Urazaeva M.N. Systematics of nonmarine bivalve mollusks from the Indian Gondwana Coal Measures (Damuda Group, Permian, India). *Paleontol. J.*, 2015, vol. 49, no. 12, pp. 1235–1274. <https://doi.org/10.1134/s0031030115120114>.
 13. Amler M.R.W., Silantiev V.V. A global review of Carboniferous marine and non-marine bivalve biostratigraphy. *Spec. Publ. – Geol. Soc. London*, 2022, vol. 512, no. 1, pp. 893–932. <https://doi.org/10.1144/sp512-2021-101>.
 14. Bakaev A.S., Kogan I. A new species of *Burguklia* (Pisces, Actinopterygii) from the Middle Permian of the Volga Region (European Russia). *PalZ*, 2020, vol. 94, pp. 93–106. <https://doi.org/10.1007/s12542-019-00487-6>.
 15. Decisions of the All-Union Conference on the Development of Unified Stratigraphic Schemes for the Precambrian, Paleozoic, and Quaternary systems of Central Siberia (1979). Part 2: Middle and Upper Paleozoic. Novosibirsk, SNIIGGiMS, 1982. 129 p. (In Russian)
 16. Decision of the Conference on the Stratigraphy of the Upper Paleozoic Deposits of Kuzbass. In: Budnikov I.V. (Ed.) *Kuzbass – klyuchevoi raion v stratigrafii verkhnego paleozoya Angaridy* [Kuzbass as a Key Region for the Late Paleozoic Stratigraphy of Angarida]. Vol. 2. Novosibirsk, YuzhSibgeolkom, PSSS “Intergeo”, 1996. pp. 93–94. (In Russian)
 17. Kutugin R.V. The Permian ammonoid family Medlicottiidae in the Verkhoyansk Region. *Paleontol. J.*, 2020, vol. 54, no. 6, pp. 571–583. <https://doi.org/10.1134/S0031030120060039>.
 18. Budnikov I.V., Kutugin R.V., Shi G.R., Sivtchikov V.E., Krivenko O.V. Permian stratigraphy and paleogeography of Central Siberia (Angaraland) – A review. *J. Asian Earth Sci.*, 2020, vol. 196, art. 104365. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2020.104365>.
 19. *Stratigraficheskiy kodeks Rossii (utverzhen Byuro MSK 18 oktyabrya 2005 g.)* [Stratigraphic Guide of Russia. Approved by the ISC Bureau on October 18, 2005]. St. Petersburg, VSEGEI, 2019. 96 p. (In Russian)
 20. International Chronostratigraphic Chart. URL: <https://stratigraphy.org/ICSchart/Chronostrat-Chart2023-06.pdf>.
 21. Kotlyar G.V., Pukhonto S.K., Burago V.I. Interregional correlation of the Permian continental and marine deposits of Northeastern Russia, Southern Far East, Siberia, and Pechora Cisurals. *Russ. J. Pac. Geol.*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1134/S1819714018010037>.
 22. Davydov V.I., Arefiev M.P., Golubev V.K., Karasev E.V., Naumcheva M.A., Schmitz M.D., Silantiev V.V., Zharinova V.V. Radioisotopic and biostratigraphic constraints on the classical Middle–Upper Permian succession and tetrapod fauna of the Moscow syncline, Russia. *Geology*, 2020, vol. 48, no. 7, pp. 742–747. <https://doi.org/10.1130/G47172.1>.
 23. Verbitskaya N.G. Kuzbass – a key region for the Upper Paleozoic stratigraphy of Angarida. In: Budnikov I.V. (Ed.) *Kuzbass – klyuchevoi raion v stratigrafii verkhnego paleozoya Angaridy* [Kuzbass – A Key Region for the Upper Paleozoic Stratigraphy of Angarida]. Vol. 1. Novosibirsk, SNIIGGiMS, 1996. pp. 115–120. (In Russian)
 24. Silantiev V., Marchetti L., Ronchi A., Schirolli P., Scholze F., Urazaeva M. Permian non-marine bivalves from the Collio and Guncina formations (Southern Alps, Italy): Revised biostratigraphy and palaeobiogeography. *Riv. Ital. Paleontol. Stratigr.*, 2022, vol. 128, no. 1, pp. 43–67. <https://doi.org/10.54103/2039-4942/17050>.
 25. Van A.V., Kazanskii Yu.P. *Vulkanicheskii material v osadkakh i osadochnykh porodakh* [Volcanic Material in Sediments and Sedimentary Rocks]. Novosibirsk, Nauka, 1985. 128 p. (In Russian)

26. Chernovyants M.G. *Tonshteiny i ikh ispol'zovanie pri izuchenii uglenosnykh formatsii* [Tonsteins and Their Use in the Study of Coal-Bearing Formations]. Moscow, Nedra, 1992. 144p. (In Russian)
27. Arbuzov S.I., Volostnov A.V., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M., Ilenok S.S. Geochemistry of radioactive elements (U, Th) in coal and peat of northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, and Mongolia). *Int. J. Coal Geol.*, 2011, vol. 86, no. 4, pp. 318–328. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.03.005>.
28. Arbuzov S.I., Spears D.A., Vergunov A.V., Ilenok S.S., Mezhibor A.M., Ivanov V.P., Zarubina N.A. Geochemistry, mineralogy and genesis of rare metal (Nb-Ta-Zr-Hf-Y-REE-Ga) coals of the seam XI in the south of Kuznetsk Basin, Russia. *Ore Geol. Rev.*, 2019, vol. 113, art. 103073. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103073>.
29. Thompson L.N., Finkelman R.B., Arbuzov S.I., French D.H. An unusual occurrence of ferroan magnesite in a tonstein from the Minusinsk Basin in Siberia, Russia. *Chem. Geol.*, 2021, vol. 568, art. 120131. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120131>.
30. Mattinson J.M. Zircon U-Pb chemical abrasion (“CA-TIMS”) method: Combined annealing and multi-step partial dissolution analysis for improved precision and accuracy of zircon ages. *Chem. Geol.*, 2005, vol. 220, nos. 1–2, pp. 47–66. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.03.011>.
31. Condon D.J., Schoene B., McLean N.M., Bowring S.A., Parrish R.R. Metrology and traceability of U–Pb isotope dilution geochronology (EARTHTIME Tracer Calibration Part I). *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2015, vol. 164, pp. 464–480. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.05.026>.
32. Gerstenberger H., Haase G. A highly effective emitter substance for mass spectrometric Pb isotope ratio determinations. *Chem. Geol.*, 1997, vol. 136, nos. 3–4, pp. 309–312. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00033-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00033-2).
33. Wiedenbeck M., Allé P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., Von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostand. Newsl.*, 1995, vol. 19, no. 1, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.1995.tb00147.x>.
34. Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundil R., Campbell I.H., Korsch R.J., Williams I.S., Foudoulis C. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element related matrix effect, SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. *Chem. Geol.*, 2004, vol. 205, nos. 1–2, pp. 115–140. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.01.003>.
35. Bowring J.F., McLean N.M., Bowring S.A. Engineering cyber infrastructure for U-Pb geochronology: Tripoli and U-Pb_Redux. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 2011, vol. 12, no. 6, art. Q0AA19. <https://doi.org/10.1029/2010GC003479>.
36. Budnikov I.V., Grinenko V.S., Klets A.G., Kutygin R.V., Sivchikov V.E. A new model for the formation of the Upper Paleozoic deposits of the Eastern Siberian Platform and its folded rim. *Otechestvennaya Geol.*, 2003, no. 6, pp. 86–92. (In Russian)
37. Kotlyar G.V., Golubev V.K., Silantiev V.V. General Stratigraphic Scale of the Permian System: A current status report. In: *Obshchaya stratigraficheskaya shkala Rossii: sostoyanie i perspektivy obustroistva* [General Stratigraphic Scale of Russia: Current Status and Refining]. Moscow, GIN Ross. Akad. Nauk, 2013. pp. 187–195. (In Russian)
38. Gutak Ya.M., Felker A.S., Silantiev V.V. Volcanic rocks in the Permian system sections of Kuzbass. *Geos. Issled.*, 2023, no. 3, pp. 52–57. <https://doi.org/10.17223/25421379/28/4>. (In Russian)
39. Durante M.V. Succession of the Late Palaeozoic plant assemblages in the Verkhoyanie. *Lethaea Rossica. Ross. Bot. Zh.*, 2010, vol. 2, pp. 45–54 (In Russian)
40. Meyen S.V. *Kordaitovye verkhnego paleozoya Severnoi Evrazii* [Upper Paleozoic Cordaites of Northern Eurasia]. Moscow, Nauka, 1966, 184 p. (In Russian)
41. Glukhova L.V., Menshikova L.V. Microstructures of cordaites from the Upper Permian deposits of the Kuznetsk basin. *Paleontol. Zh.*, 1980, no. 3, pp. 107–117. (In Russian)
42. Durante M.V. Reconstruction of the Late Paleozoic climatic changes in the Angaraland according to phytogeographic data. *Stratigr. Geol. Correl.*, 1995, vol. 3, no. 2, pp. 123–133.
43. Gorelova S.G., Batyaeva S.K. Fossil plants. In: Zhuravleva I.T., Il'yina V.I. (Eds.) *Verhnii paleozoi Angaridy* [The Upper Paleozoic of Angarida]. Novosibirsk, Nauka, 1988. pp. 71–80. (In Russian)

44. Grunt T.A. *Late Permian of the Kanin Peninsula*. Moscow, Nauka, 2006. 213 p.
45. Grunt T.A. Correlations between the General Permian Stratigraphic Scale of Russia, the Russian regional scales, and the Standard Global Chronostratigraphic Scale. *Obshchaya stratigraficheskaya shkala Rossii: sostoyaniye i problemy obustroystva. Vserossiiskoe soveshchanie* [General Stratigraphic Scale of Russia: Current Status and Refining. Proc. All-Russ. Conf.]. Moscow, GIN Ross. Akad. Nauk, 2013. pp. 214–217. (In Russian)
46. Chen B., Joachimski M.M., Shen S., Lambert L.L., Lai X., Wang X., Chen J., Yuan D. Permian ice volume and palaeoclimate history: Oxygen isotope proxies revisited. *Gondwana Res.*, 2013, vol. 24, no. 1, pp. 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.07.007>.
47. Davydov V.I. Warm water benthic foraminifera document the Pennsylvanian–Permian warming and cooling events – the record from the Western Pangea tropical shelves. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 2014, vol. 414, pp. 284–295. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.09.013>.
48. Davydov V.I., Biakov A.S., Isbell J.L., Crowley J.L., Schmitz M.D., Vedernikov I.L. Middle Permian U–Pb zircon ages of the “glacial” deposits of the Atkan Formation, Ayan-Yuryakh anticlinorium, Magadan province, NE Russia: Their significance for global climatic interpretations. *Gondwana Res.*, 2016, vol. 38, pp. 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.10.014>.
49. Rygel M.C., Fielding C.R., Frank T.D., Birgenheier L.P. The magnitude of late Paleozoic glacioeustatic fluctuations, a synthesis. *J. Sediment. Res.*, 2008, vol. 78, no. 8, pp. 500–511. <https://doi.org/10.2110/jsr.2008.058>.

Для цитирования: Силантьев В.В., Гутак Я.М., Тихомирова М., Кесснер А., Пороховниченко Л.Г., Карасев Е.В., Фелькер А.С., Уразаева М.Н., Жаринова В.В. Позднекунгурский радиоизотопный возраст границы между балахонской и кольчугинской сериями Кузнецкого бассейна (Западная Сибирь, Россия) – дополнительное обоснование валидности уфимского яруса Восточно-Европейской шкалы пермской системы // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 664–687. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.664-687>.

For citation: Silantiev V.V., Gutak Ya.M., Tichomirowa M., Käßner A., L.G. Porokhovnichenko, Karasev E.V., Felker A.S., Urazaeva M.N., Zharinova V.V. Late Kungurian radioisotope age of the boundary between the Balakhonka and Kolchugino Groups in the Kuznetsk Basin (Western Siberia, Russia) – additional evidence for the validity of the Ufimian Stage of the East European Permian. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 664–687. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.664-687>. (In Russian)

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 56.016.4+551.734

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.688-700

**ПРИМЕНЕНИЕ ИХНОФОССИЛИЙ ДЛЯ КОРРЕЛЯЦИИ
НЕФТЕНОСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ТЕРРИГЕННОГО ДЕВОНА
(ПАШИЙСКИЙ И ТИМАНСКИЙ ГОРИЗОНТЫ)
ЮЖНО-ТАТАРСКОГО СВОДА**

Д.Н. Мифтахутдинова

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

Аннотация

Впервые проведено ихнологическое изучение пород терригенной толщи среднего девона Южно-Татарского свода (ЮТС). Анализ стратиграфического распределения ископаемых следов жизнедеятельности в разрезах позволил установить несколько уровней, содержащих биогенные структуры (ихнотаксоны и биотурбация), которые могут использоваться при сопоставлении разрезов. Приграничный интервал пашийского и тиманского горизонтов содержит последовательность пород: биотурбированные алевролиты с ходами *Spirophyton*, известняк, аргиллит с ходами *Lingulichnus*. Интервал прослеживается по всей территории ЮТС и может использоваться как дополнительный маркер границы горизонтов.

Ключевые слова: ихнофоссилии, ихностратиграфия, терригенный девон, пашийский горизонт, Волго-Уральская область.

Введение

В настоящее время следы жизнедеятельности организмов, к которым относятся ихнофоссилии и биотурбация, широко используются при изучении осадочных толщ фанерозоя. Особенно ценны они для реконструкций условий осадконакопления. При этом применение ихнофоссилий для стратиграфического расчленения и корреляции в привычном понимании сталкивается с комплексом проблем и ограничений. Первое ограничение – невозможность однозначно диагностировать организм-следопроизводитель: сходные по морфологии ходы могут оставлять разные организмы, но и один организм в зависимости от поведения (отдых, питание, передвижение) может производить разные ходы [1, 2]. Второе ограничение связано со слабой эволюцией ихнофоссилий: основные ихнотаксоны появились в раннем палеозое и с течением геологического времени незначительно усложнялись или захватывали более широкие обстановки осадконакопления [2]. Третье ограничение, связанное с приуроченностью ихнотаксонов к фациям и тесной связью с палеогеографическими условиями, позволяет использовать их при стратиграфическом расчленении и корреляции сближенных частных разрезов или местных стратиграфических подразделений, детализируя описание и интерпретацию условий осадконакопления.

Несмотря на перечисленные ограничения, ихнофоссилии могут эффективно использоваться при корреляции фациально изменчивых терригенных отложений, в которых отсутствуют или редко встречаются фаунистические остатки. В этой связи терригенная толща девона Южно-Татарского свода (ТТД ЮТС), характеризующаяся сильной литолого-фациальной изменчивостью и почти полным отсутствием палеонтологических остатков, в том числе зональных видов морской фауны, является прекрасным объектом для ихнологических исследований.

Цель исследования – установить возможность корреляции девонских отложений Южно-Татарского свода (ЮТС) Волго-Уральской нефтегазоносной провинции по ихнофоссилиям. Задачи исследования включали поиск и определение ихнофоссилий в керне скважин и изучение их пространственно-временного распределения в разрезах.

1. Материал для исследования

Материалом для проведения исследований послужил керн скважин, вскрывающих девонские терригенные отложения в пределах ЮТС (рис. 1). При изучении керна выяснилось, что практически все породы ТТД ЮТС в разной степени биотурбированы и содержат многочисленные и разнообразные ихнофоссилии разной степени сохранности. Всего было изучено более 500 м керна из 32 скважин. Обработанная коллекция пород хранится в Геологическом музее КФУ (коллекция КП1131/КМ44).

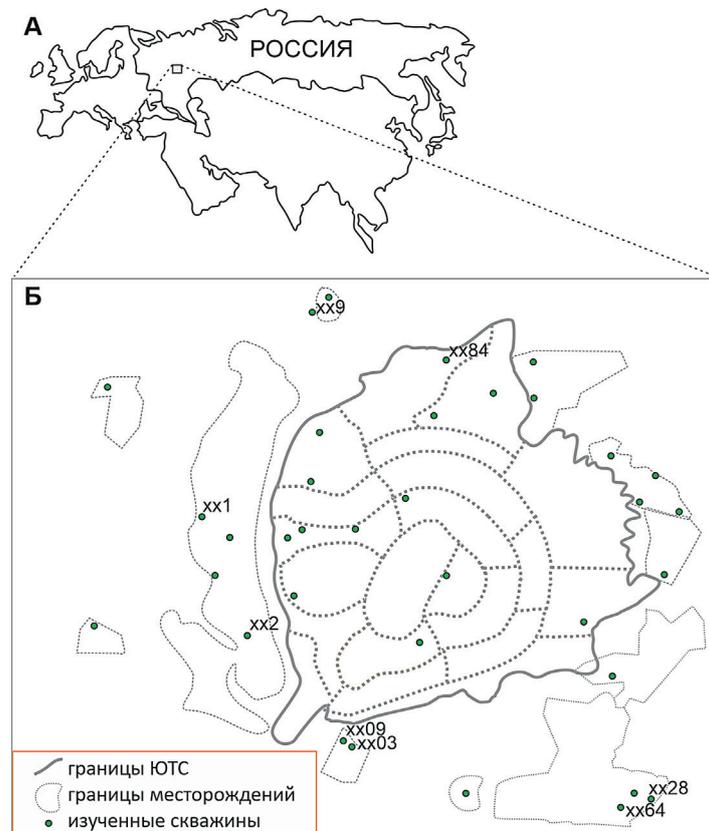


Рис. 1. Местоположение изученных скважин

2. Методы изучения

Макроописание керна проводилось непосредственно в кернохранилище ПАО «Татнефть» в г. Бугульма и кернохранилище Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета. Перед описанием керн отмывали от бурового раствора, при возможности керновые цилиндры распиливали поперек и вдоль напластования. В процессе литолого-седиментологического описания фиксировали цвет, текстуру, структуру породы, характер слоистости, сортировки, наличие ритмичности или перерывов в переслаивании пород, вторичных изменений, наличие и характер фауны, флоры. Более детально изучали и описывали биогенные структуры пород, к которым относятся ихнофоссилии и биотурбация.

Горные породы, содержащие ихнофоссилии и выраженную биотурбацию, изучали методами ихнофациального [3] и ихнотекстурного [4] анализа. *Ихнофациальный анализ* включал морфологическое описание ихнофоссилий, определение ихнотаксонов и выявление ихнокомплексов. *Ихнотекстурный анализ* использовали для определения характера биотурбации – биогенных текстурных особенностей пород, возникших в результате воздействия живых организмов на осадок. Интенсивность переработки пород определяли по качественной шкале ихнотекстурного индекса (ii) [4] с помощью специальной палетки и выражали в баллах от 1 до 5.

3. Краткая геологическая и ихнологическая характеристика терригенной толщи девона Южно-Татарского свода

ЮТС – это крупная положительная тектоническая структура первого порядка, расположенная на востоке Восточно-Европейской платформы. ТТД ЮТС – это относительно мощная осадочная последовательность, сложенная породами эйфельского, живетского и франского ярусов. ТТД ЮТС является крупным нефтеносным объектом, к которому приурочено уникальное по запасам Ромашкинское месторождение и ряд более мелких месторождений Республики Татарстан. Геология ТТД ЮТС имеет долгую историю изучения и рассматривается в многочисленных публикациях. Обзор эволюции взглядов на объемы стратиграфических подразделений ТТД ЮТС, ее положение в современной Международной хроностратиграфической шкале и Общей стратиграфической шкале России, а также ее краткая ихнологическая характеристика приведены в [5].

Разрез ТТД ЮТС начинается с отложений бийского горизонта эйфельского яруса, залегающего на размытой поверхности кристаллического фундамента.

Бийский горизонт в пределах ЮТС включает гравийно-песчаную пачку, представленную неотсортированными разнозернистыми песчаниками, с большим количеством обугленных растительных остатков и стяжениями пирита (пласт ДV, пропластки ДV-а, -б, -в) (рис. 2). Выше залегает карбонатно-аргиллитовая пачка, сложенная темно-серыми глинистыми органогенными известняками и доломитами, с прослоями глинисто-битуминозных пород (репер «нижний известняк») (рис. 2).

Выше бийского горизонта, со стратиграфическим перерывом, залегает *воробьевский горизонт*, включающий пласт ДIV и аргиллитово-алевролитовую пачку [7]. Пласт ДIV на территории ЮТС сложен крупно- и мелкозернистыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами. Горизонт сильно биотурбирован (ii 5), с ходами *Zoophycos* и *Spirophyton* [5, 8]. Часто воробьевский горизонт неотделим от

вышележащего *ардатовского горизонта*, представленного преимущественно хорошо сортированными алевролитами с прослоями аргиллитов и известняков (репер «средний известняк»). Ихнофоссилии ардатовского горизонта представлены многочисленными *Zoophycos*, *Chondrites*, *Spirophyton* и *Planolites*, ихнотекстурный индекс достигает ii 5. *Муллинский горизонт* включает две пачки: алеврито-песчаниковую (пласт ДII) и глинисто-карбонатную (репер «черный известняк»). Муллинские отложения характеризуются увеличением разнообразия биогенных структур по сравнению с нижележащими горизонтами. Ихнокомплекс дополняется вертикальными ходами *Teichichnus* и неопределимыми вертикальными ходами плохой сохранности. Ихнотекстурный индекс не превышает ii 3. В горизонте выделяется мощный (около 10 м) слой тонкослоистых линзовидных аргиллитов с беззамковыми брахиоподами лингулами, в котором биотурбация не фиксируется.

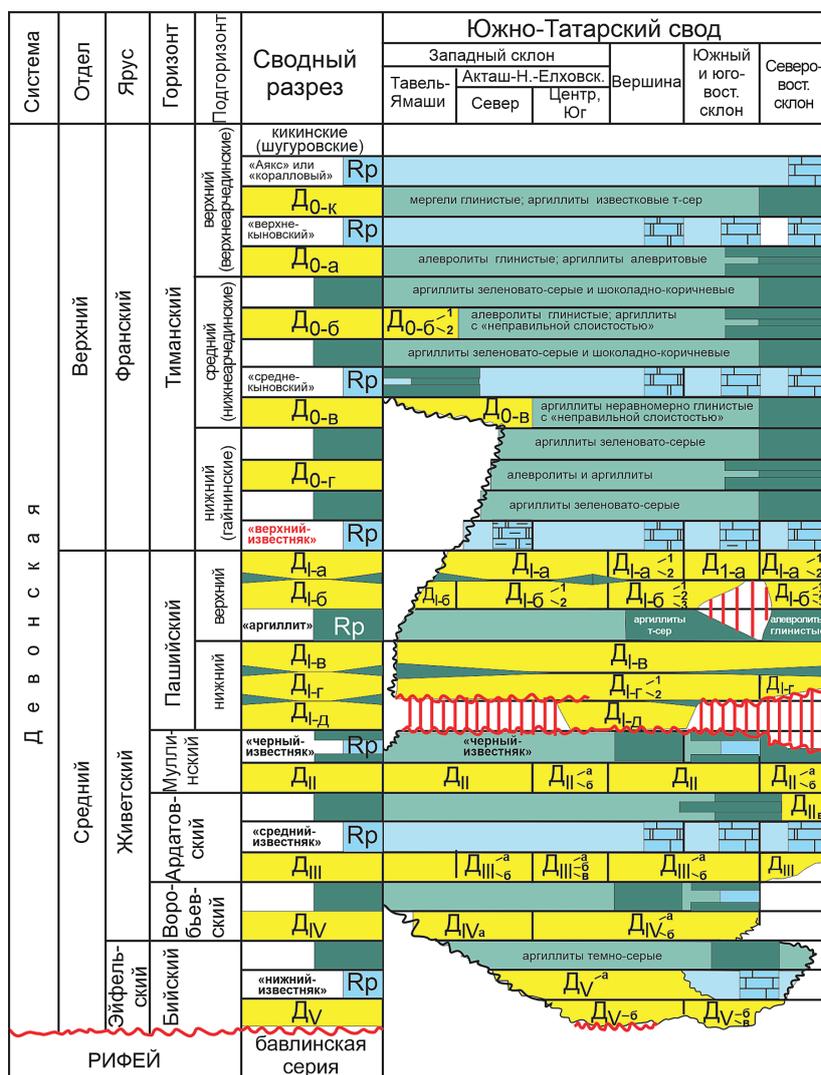


Рис. 2. Схема нефтеносных пластов (D0–DV) и полнота разрезов терригенной толщи среднего девона ЮТС, вне масштаба [6, с изменением], Rp – реперные карбонатные и глинистые интервалы и пласты, желтый цвет – алеврито-песчаные породы (коллекторы), голубой цвет – известняки и доломиты, зеленый цвет – аргиллиты

Пашийский горизонт сложен хорошо отсортированными мелкозернистыми песчаниками и крупнозернистыми алевролитами (пласт ДІ), биотурбированными алевролитами и аргиллитами, несортированными глинисто-алевритовыми породами. Ихнофоссилии представлены ходами *Chondrites*, *Spirophyton*, *Scolicia*, *Planolites*, *Palaeophycus*, *Zoophycos* и *Skolithos*.

Тиманский горизонт в пределах ЮТС сложен аргиллитами, алевролитами и песчаниками с выдержанными пластами известняков в нижней (репер «средний известняк») и верхней (репер «аяксы») части горизонта. Ихнотекстурный индекс в породах пашийского горизонта изменяется от $ii\ 2$ до $ii\ 5$, ихнофоссилии представлены ходами *Lingulichnus*, *Planolites* и *Skolithos* [8].

4. Результаты

В отложениях пашийского и тиманского горизонта установлено девять ихнотаксонов (табл. 1). Ихноразнообразие и степень биотурбации (усредненно по всему горизонту) в пашийском горизонте выше, чем в тиманском. Пашийско-тиманские ихнотаксоны формируют три ихнокомплекса (*Zoophycos-Chondrites-Planolites*, *Planolites-Skolithos* и *Lingulichnus*), тесно связанные с литологией и гидродинамикой.

Табл. 1

Этологические и трофические характеристики продуцентов ихнофоссилий пашийско-тиманского интервала ТТД ЮТС

Ихнотаксон	Этологическая группа	Трофическая группа
<i>Arenicolites</i>	Домихния	Поедатели суспензии
<i>Chondrites</i>	Фодинихния	Поедатели осадка
<i>Lingulichnus</i>	Домихния	Поедатели осадка
<i>Palaeophycus</i>	Фодинихния/домихния	Поедатели осадка
<i>Planolites</i>	Фодинихния	Поедатели осадка
<i>Scolicia</i>	Фодинихния	Поедатели осадка
<i>Skolithos</i>	Домихния	Поедатели суспензии
<i>Spirophyton</i>	Фодинихния	Поедатели осадка
<i>Zoophycos</i>	Фодинихния	Поедатели осадка

Чаще остальных встречается ихнокомплекс *Planolites-Skolithos*, приуроченный к алевролитам и ритмитам – интервалам тонкого переслаивания разнозернистых пород. Ихнокомплекс *Lingulichnus* включает одноименные вертикальные ходы и приурочен к аргиллитам тиманского горизонта, а ихнокомплекс *Zoophycos-Chondrites-Planolites* включает горизонтальные и слабо наклонные ходы, приуроченные к сильно биотурбированным алевролитам. Набор таксонов в ихнокомплексе *Zoophycos-Chondrites-Planolites* изменяется по разрезу и включает, кроме номинальных таксонов, ходы *Spirophyton*, *Palaeophycus*, *Scolicia*.

По этологической классификации А. Зейлахера [9, 10] основная часть комплекса ихнофоссилий пашийско-тиманского горизонтов ТТД ЮТС относятся к фодинихнии – следам питания илоедов (табл. 1). В отложениях ТТД ЮТС ходы домихния (следы зарывания) отличаются от ходов фодинихния хорошо определенным гравитационным заполнением (внутренние пустоты ходов засыпаны вышележащим осадком).

В скважинах, где изучены и отобраны пограничные отложения пашийского и тиманского горизонта (скважины хх2, хх9, хх64, хх28, хх03, хх09, хх84) (рис. 1), установлены интервалы с характерными биогенными структурами: интервал биотурбированных алевролитов с ходами *Spirophyton* и интервал тонкослоистых аргиллитов с ходами беззамковых брахиопод *Lingulichnus*.

Интервал с ходами *Spirophyton* выделен в верхней части пашийского горизонта и сложен хорошо сортированными светло-серыми алевролитами. Биотурбация практически полностью уничтожила первичную текстуру пород. Вторичная сидеритизация подчеркивает *Spirophyton* (рис. 3, а–з). Кроме ходов *Spirophyton*, в алевролитах зафиксированы единичные, плохой сохранности ходы *Planolites* и *Skolithos*. Алевролиты со *Spirophyton* перекрываются либо глинистыми известняками (скважины хх2, хх64, хх84, хх03, хх09), либо аргиллитами (скважина хх28).

В аргиллитах, перекрывающих алевролиты с ходами *Spirophyton*, сохранились горизонтальные следы передвижения и вертикальные конусообразные структуры *Lingulichnus* (рис. 3, д–е), представляющие собой остатки ходов вертикального передвижения беззамковых брахиопод-лингулид – обитателей мягкого дна приливно-отливных зон водоемов с пониженной соленостью.

На ЮТС раковины лингул в норках *Lingulichnus* встречены во всех изученных скважинах, которые вскрыли отложения нижней части тиманского горизонта (скважины хх2, хх28, хх84, хх09). В изученных скважинах интервал аргиллитов с ходами *Lingulichnus* залегает либо непосредственно выше кровли известняков репера «верхний известняк», либо на биотурбированных алевролитах со *Spirophyton*. Аргиллиты с *Lingulichnus* содержат уникальное по биоразнообразию и степени сохранности захоронение бесскелетной и скелетной фауны и проблематичных остатков (лагерштетт, *Konservat-Lagerstätten*). Здесь установлены отпечатки мягких тканей многощетинковых червей-полихет, мелкие дискообразные проблематичные остатки, отпечатки конодонтов, раковины лингул с сохранившимися мягкими внутренними органами, двустворчатые моллюски, остракоды, конхостраки. Этот интервал прослеживается в пределах нескольких площадей: скважины хх1 и хх2 (Ново-Елховское нефтяное месторождение), хх09 (Глазовское нефтяное месторождение) (рис. 1).

5. Обсуждение результатов

На ЮТС граница между пашийским и тиманских горизонтами проводится в подошве известняков геофизического репера «верхний известняк». На геофизических кривых положение репера определяется по резкому повышению показателей сопротивления пород, мощность реперного пласта изменяется 0.4 до 3 м [11]. В некоторых разрезах пласт известняков маломощный (первые десятки сантиметров, скважина хх2, Ново-Елховское нефтяное месторождение) или отсутствует (скважина хх28, Бавлинское нефтяное месторождение), что усложняет разделение пашийского и тиманского горизонтов по геофизическим данным (рис. 4).

Ходы *Spirophyton* Hakes, 1863 отличаются от «классического», почти планарного (плоскостного) *Zoophycos* Massalongo ярко-выраженной штопорообразной формой, состоящей из завитков, обмотанных вокруг центрального осевого вала (рис. 3, в, з) [12, 13]. Такая форма и вторичная сидеритизация пород позволила диагностировать их в вертикальном сечении керна скважин (рис. 3, а–з).

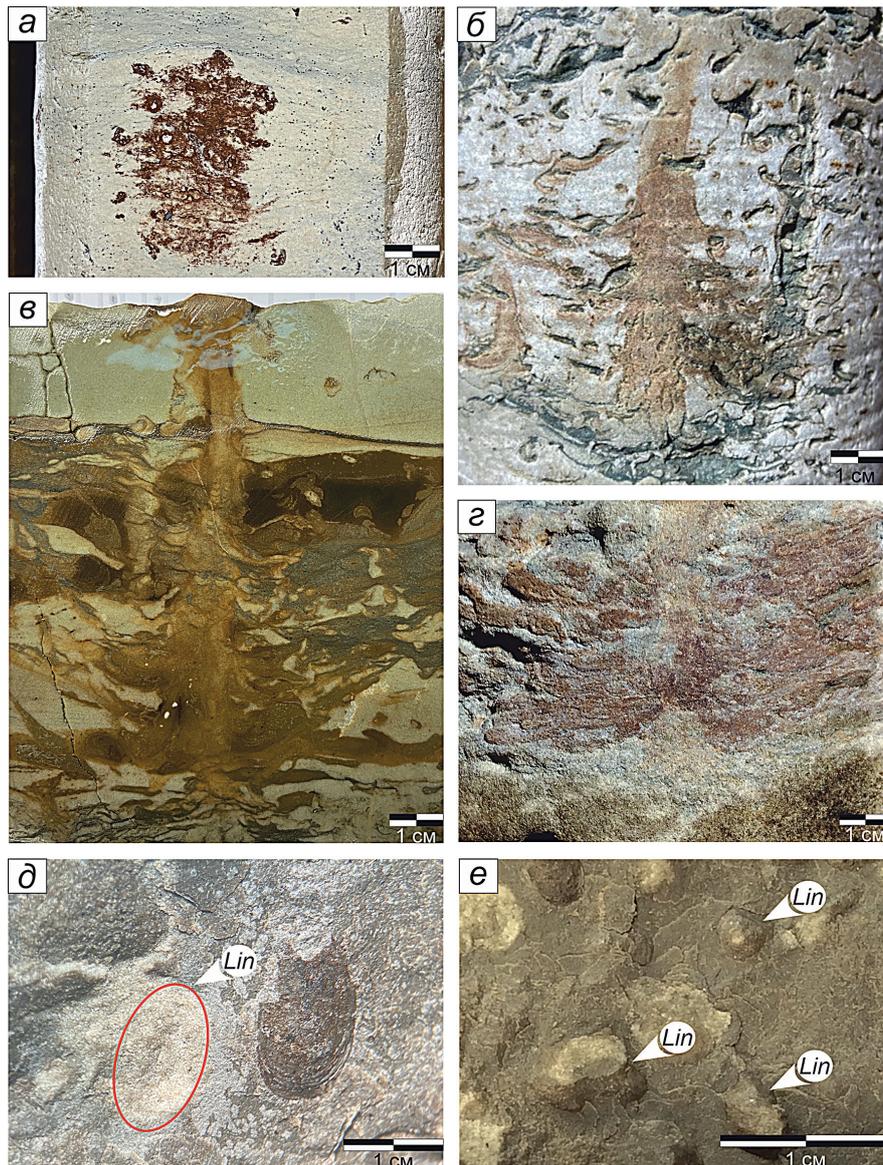


Рис. 3. Ходы *Spirophyton* и *Lingulichnus* из ТТД ЮТС: а) ходы *Spirophyton* (?), выполненные сидеритом. Предположительно вторичная сидеритизация произошла по зонам, ослабленным биотурбацией. Скважина хх28, Бавлинская, глубина 1823 м, пашийский горизонт, образец КП1131/КМ44/17; б) ходы *Spirophyton*, выполненные сидеритом, в алевролите. Скважина хх2, Ново-Елховская, глубина 1679.2 м, пашийский горизонт, образец КП1131/КМ44/1; в) ходы *Spirophyton* в поперечном сечении биотурбированного алевролита. Ход подчеркивается вторичной сидеритизацией. Скважина хх09, Глазовская, глубина 1717.4 м, пашийский горизонт, образец КП1131/КМ44/10; г) ходы *Spirophyton* в боковой стенке кернового цилиндра подчеркнутые вторичной сидеритизацией. Скважина хх9, Бастрькская, глубина 1697 м, пашийский горизонт, фото из кернохранилища; д) ходы *Lingulichnus* (красный овал), заполненные алевитистым материалом, на верхней поверхности напластования алевитистого аргиллита с лингулами. Увеличение х40, скважина хх09, Глазовская, глубина 1704.5 м, тиманский горизонт, образец КП1131/КМ44/9; е) сечение хода *Lingulichnus* на нижней поверхности напластования алевитистого аргиллита с лингулами. Скважина хх09, Глазовская, глубина 1716.7 м, тиманский горизонт, образец КП1131/КМ44/2

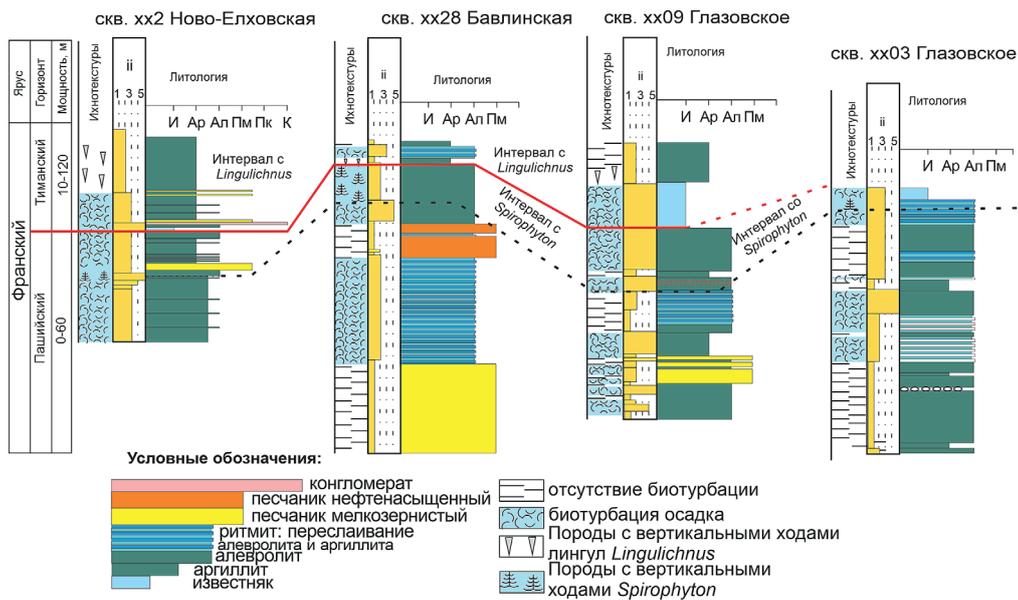


Рис. 4. Схема сопоставления скважин с характерными интервалами биотурбированных алевролитов с ходами *Spirophyton* и аргиллитов с ходами *Lingulichnus* в приграничном интервале пашийского и тиманского горизонтов. Сокращения: И – известняк, Ар – аргиллит, Ал – алевролит, Пм – песчаник мелкозернистый, Пк – песчаник крупнозернистый, К – конгломерат (гравелит)

Кроме наличия характерных ходов *Spirophyton*, верхняя часть пашийского горизонта характеризуются интенсивной многоярусной биотурбацией (до 100% переработки первичного осадка), с многочисленными, наложенными друг на друга, сильно деформированными ходами. Такой характер биотурбации указывает на плотную заселенность морского дна и субстрата осадка бентосными организмами, жившими на поверхности дна и внутри осадка.

Ихнород *Lingulichnus* Hakes, 1976 давно и широко используется для детальной реконструкции обстановок осадконакопления [14–18], в том числе при изучении керна скважин [2]. На нижней поверхности напластования аргиллитов норки *Lingulichnus* выглядят как конусовидные возвышения; наблюдаются они в подошве слоя, таким образом, конусы ориентированы вниз (рис. 3, e). Норки *Lingulichnus* обычно доминируют в мелководных, окраинно-морских отложениях [17] и в приливно-отливной зоне (foreshore). Встречаются в штормовых осадках (темпеститах) в условиях от ближнего шельфа (proximal offshore) до нижней части берегового склона (lower shoreface). Обязательное условие сохранения *Lingulichnus* – быстрое или внезапное захоронение норок. Вероятность сохранности норок в мягких глинистых интенсивно биотурбированных осадках невелика [18]. Поскольку лингулиды могут переносить колебания и понижения солености, норки *Lingulichnus* являются индикаторами окраинных морских бассейнов с пониженной соленостью и содержание кислорода (например, в лагунах и эстуариях).

Сохранение мягких тканей организмов возможно в бескислородной среде при минимальном преобразовании осадка после захоронения и отсутствии сильного нагрева породы. Бескислородная среда накопления аргиллитов подтверждает

ется скоплениями фрамбоидного пирита на поверхностях напластования аргиллитов, на раковинах и мягких тканях беспозвоночных. Наличие фрамбоидного пирита указывает на бескислородные условия осадка (и, возможно, придонного слоя воды) [19].

Заключение

В пограничном интервале пашийского и тиманского горизонтов ТТД ЮТС установлена последовательность пород, включающая (снизу вверх) биотурбированные алевролиты с ходами *Spirophyton*, органогенные известняки (геофизический репер «верхний известняк») и аргиллит с норками *Lingulichnus*. Эта последовательность прослежена во многих скважинах, находящихся на значительном удалении друг от друга, и может рассматриваться как маркирующий горизонт с ихнофоссилиями. Применение установленного маркирующего горизонта со *Spirophyton* и *Lingulichnus* имеет большое значение в наиболее терригенных типах разреза пашийско-тиманских отложений, в которых реперный пласт «верхнего известняка» выклинивается.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания проект № FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности.

Литература

1. *Микулаш Р., Дронов А.В.* Палеоихнология – введение в изучение ископаемых следов жизнедеятельности. Прага: Геологический институт Академии наук Чешской Республики, 2006. 122 с.
2. *Knaust D.* Atlas of Trace Fossils in Well Core: Appearance, Taxonomy and Interpretation. Cham: Springer, 2017. xv, 209 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49837-9>.
3. *Seilacher A.* Bathymetry of trace fossils // *Mar. Geol.* 1967. V. 5, No 5–6. P. 413–428. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(67\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0025-3227(67)90051-5).
4. *Droser M.D., Bottjer D.J.* A semiquantitative field classification of ichnofabric // *J. Sediment. Res.* 1986. V. 56, No 4. P. 556–559. <https://doi.org/10.1306/212F89C2-2B24-11D7-8648000102C1865D>.
5. *Силантьев В.В., Валидов М.Ф., Мифтахутдинова Д.Н., Морозов В.П., Ганиев Б.Г., Лутфуллин А.А., Шуматбаев К.Д., Хабипов Р.М., Нургалиева Н.Г., Толоконникова З.А., Королев Э.А., Судаков В.А., Смирнова А.В., Голод К.А., Леонтьев А.А., Шамсиев Р.Р., Нойкин М.В., Косарев В.Е., Никонорова Д.А., Ахметов Р.Ф.* Модель осадконакопления пашийского горизонта (терригенная толща девона) Южно-Татарского свода Волго-Уральской нефтегазоносной провинции // *Георесурсы.* 2022. Т. 24, № 4. С. 12–39. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.4.2>.
6. *Данилова Т.Е.* Атлас пород основных нефтеносных горизонтов палеозоя республики Татарстан. Терригенные породы девона и нижнего карбона. Казань: Плутон, 2008. 440 с.
7. *Микрюков М.Ф., Тимергазин К.Р.* Новые данные по стратиграфии и литологии терригенных отложений девона Бавлинско–Туймазинского нефтеносного района // *Нефтяное хозяйство.* 1948. № 9. С. 43–53.
8. *Мифтахутдинова Д.Н., Силантьев В.В.* Ихнофациальный анализ терригенного девона Южно–Татарского свода // *Палеострат – 2022: тезисы докладов.* М.: ПИН РАН, 2022. С. 42–43.

9. *Seilacher A.* Studien zur Palichnologie. I. Über die Methoden der Palichnologie // Neues Jahrb. Geol. Palaeontol., Abh. 1953. Bd. 96. S. 421–452.
10. *Seilacher A.* Trace Fossil Analysis. Berlin; Heidelberg: Springer, 2007. xiii, 226 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-47226-1>.
11. Геология Татарстана. Стратиграфия и тектоника / под ред. Б.В. Булова, Н.К. Есауловой, В.С. Губаревой. М: ГЕОС, 2003. 402 с.
12. *Häntzschel W.* Suppl. 1: Trace fossils and problematica: 2nd ed. (revised and enlarged) // Treatise on Invertebrate Paleontology. Part W: Miscellanea / Ed. by C. Teichert. Boulder, CO; Lawrence, KS: Geol. Soc. Am. and Univ. of Kansas, 1975. 269 p.
13. *Miller M.F.* Morphology and paleoenvironmental distribution of Paleozoic *Spirophyton* and *Zoophycos*: Implications for the *Zoophycos* ichnofacies // PALAIOS. 1991. V. 6, No 4. P. 410–425. <https://doi.org/10.2307/3514966>.
14. *Emig C.C., Gall J.-C., Pajaud D., Plaziat J.-C.* Réflexions critiques sur l'écologie et la systématique des Lingules actuelles et fossiles // Geobios. 1978. V. 11, No 5. P. 573–609. [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(78\)80001-1](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(78)80001-1).
15. *Thayer C.W., Steele-Petrovič H.M.* Burrowing of the lingulid brachiopod *Glottidia pyramidata*: Its ecologic and paleoecologic significance // Lethaia. 1975. V. 8, No 3. P. 209–221. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.1975.tb00925.x>.
16. *Zonneveld J.-P., Pemberton S.G.* Ichnotaxonomy and behavioral implications of lingulide-derived trace fossils from the Lower and Middle Triassic of Western Canada // Ichnos. 2003. V. 10, No 1. P. 25–39. <https://doi.org/10.1080/10420940390238249>.
17. *Zonneveld J.-P., Beatty T.W., Pemberton S.G.* Lingulide brachiopods and the trace fossil *Lingulichnus* from the Triassic of Western Canada: Implications for faunal recovery after the end-Permian mass extinction // PALAIOS. 2007. V. 22, No 1. P. 74–97. <https://doi.org/10.2110/palo.2005.p05-103r>.
18. *Kowalewski M., Demko T.M.* Trace fossils and population paleoecology: Comparative analysis of size–frequency distributions derived from burrows // Lethaia. 1996. V. 29, No 2. P. 113–124. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.1996.tb01867.x>.
19. *Silantiev V.V., Miftakhutdinova D.N., Zharinova V.V., Urazaeva M.N.* Evidence for soft-bodied organisms and invertebrate soft tissues in mudstones of the Timanian Horizon (Devonian, Frasnian) of the Southern Tatarian Dome (East European Platform). Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting 2021: abstract volume. Kazan: Kazan University Press, 2021. P. 55.

Поступила в редакцию 04.11.2023

Принята к публикации 01.12.2023

Мифтахутдинова Динара Надировна, младший научный сотрудник НИЛ изучения состояния и эволюции подземных резервуаров Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет

ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия

E-mail: Dinara.Miftakhutdinova@kpfu.ru

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.688-700

Using Ichnofossils to Correlate Oil-Bearing Deposits in the Devonian Clastic Succession (Pashyian and Timanian Horizons) of the South Tatar Arch

D.N. Miftakhutdinova

Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

E-mail: Dinara.Miftakhutdinova@kpfu.ru

Received November 4, 2023; Accepted December 1, 2023

Abstract

This article outlines the results of the first-ever ichnological study of the Middle Devonian clastic succession in the South Tatar Arch. The analysis of the stratigraphic distribution of trace fossils in the boreholes revealed several levels with biogenic structures such as ichnofossils and bioturbation, which proved useful for the correlation of the boreholes. The boundary interval of the Pashyian and Timanian Horizons is made up by a succession of three layers: bioturbated siltstones with *Spirophyton* burrows, limestones, and mudstones with *Lingulichnus* burrows. The interval can be traced over the entire area of the South Tatar Arch and may serve as an additional marker for the boundary between the horizons.

Keywords: ichnofossils, ichnostratigraphy, Devonian clastic succession, Pashyian Horizon, Volga-Ural region

Acknowledgements. This study was supported by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment in the sphere of scientific activities (project no. FZSM-2023-0023).

Figure Captions

Fig. 1. Locations of the studied boreholes.

Fig. 2. Scheme of the oil-bearing strata (D0–DV) and completeness of the sections of the Middle Devonian clastic succession of the South Tatar Arch, out of scale [6, with modification], Rp – reference carbonate and clay intervals and strata, yellow color – silt and sand rocks (reservoirs), blue color – limestones and dolomites, green color – argillites.

Fig. 3. *Spirophyton* and *Lingulichnus* burrows from the Devonian clastic succession of the South Tatar Arch: a) *Spirophyton* (?) burrows with siderite. Presumably, secondary sideritization occurred in zones weakened by bioturbation. Borehole xx28, Bavlinskoe field, depth 1823 m, Pashyian Horizon, sample KP1131/KM44/17; b) *Spirophyton* burrows, filled with siderite, in siltstone. Borehole xx2, Novo-Elkhovskoe field, depth 1679.2 m, Pashyian Horizon, sample KP1131/KM44/1; c) *Spirophyton* burrows in the cross section of bioturbated siltstone. The trace is emphasized by secondary sideritization. Borehole xx09, Glazovskoe field, depth 1717.4 m, Pashyian Horizon, sample KP1131/KM44/10; d) *Spirophyton* burrows in the core cylinder, emphasized by secondary sideritization. Borehole xx9, Bastrykskoe field, depth 1697 m, Pashyian Horizon, photo from the core storage; e) *Lingulichnus* burrows (red oval), filled with silty material, on the upper bedding surface of silty mudstone with lingules. Magnification x40, borehole xx09, Glazovskoe field, depth 1704.5 m, Timanian Horizon, sample KP1131/KM44/9; f) Section of the *Lingulichnus* burrow on the lower bedding surface of silty mudstone with lingules. Borehole xx09, Glazovskoe field, depth 1716.7 m, Timanian Horizon, sample KP1131/KM44/2.

Fig. 4. Scheme for comparison of the boreholes with characteristic intervals of bioturbated siltstones and *Spirophyton* burrows and argillites with *Lingulichnus* burrows in the border interval of the Pashyian and Timanian Horizons.

References

1. Mikuláš R., Dronov A. *Paleoikhnologiya – vvedenie v izuchenie iskopaemykh sledov zhiznedeyatel'nosti* [Palaeoichnology – Introduction to the Study of Trace Fossils]. Prague, Geol. Inst. Akad. Nauk Cheshsk. Resp., 2006, 122 p. (In Russian)
2. Knaust D. *Atlas of Trace Fossils in Well Core: Appearance, Taxonomy and Interpretation*. Cham, Springer, 2017. xv, 209 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49837-9>.
3. Seilacher A. Bathymetry of trace fossils. *Mar. Geol.*, 1967, vol. 5, nos. 5–6, pp. 413–428. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(67\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0025-3227(67)90051-5).
4. Droser M.D., Bottjer D.J. A semiquantitative field classification of ichnofabric. *J. Sediment. Res.*, 1986, vol. 56, no. 4, pp. 556–559. <https://doi.org/10.1306/212F89C2-2B24-11D7-8648000102C1865D>.
5. Silantiev V.V., Validov M.F., Miftakhutdinova D.N., Morozov V.P., Ganiev B.G., Lutfullin A.A., Shumatbaev K.D., Khabipov R.M., Nurgalieva N.G., Tolokonnikova Z.A., Korolev E.A., Sudakov V.A., Smirnova A.V., Golod K.A., Leontiev A.A., Shamsiev R.R., Noykin M.V., Kosarev V.E., Nikonorova D.A., Akhmetov R.F. Sedimentation model of the middle Devonian clastic succession of the South Tatar Arch, Pashyian Regional stage, Volga-Ural Oil and Gas Province, Russia. *Georesursy*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 12–39. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.4.2>. (In Russian)
6. Danilova T.E. *Atlas porod osnovnykh neftenosnykh gorizontov paleozoya Respubliki Tatarstan. Terrigennye porody devona i nizhnego karbona* [Atlas of Paleozoic Rocks of the Main Oil-Bearing Horizons of the Republic of Tatarstan. Terrigenous Deposits from the Devonian to Lower Carboniferous]. Kazan, Pluton, 2008. 440 p. (In Russian)
7. Mikryukov M.F., Timergazin K.R. New data on stratigraphy and lithology of terrigenous deposits of the Devonian of the Bavlinsko-Tuymazinsky oil-bearing area. *Neftyanoe Khozyaistvo*, 1948, no. 9, pp. 43–53. (In Russian)
8. Miftakhutdinova D.N., Silantiev V.V. Ichnofacial analysis of the Devonian clastic succession of the South Tatar Arch. In: *Paleostrat – 2022: tezisy dokladov* [Paleostrat – 2022: Abstracts]. Moscow, PIN Ross. Akad. Nauk, 2022, pp. 42–43. (In Russian)
9. Seilacher A. Studien zur Palichnologie. I. Über die Methoden der Palichnologie. *Neues Jahrb. Geol. Palaeontol., Abh.*, 1953, Bd. 96, S. 421–452. (In German)
10. Seilacher A. *Trace Fossil Analysis*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2007. xiii, 226 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-47226-1>.
11. *Geologiya Tatarstana. Stratigrafiya i tektonika* [Geology of Tatarstan. Stratigraphy and Tectonics]. Burov B.V., Esaulova N.K., Gubareva V.S. (Eds.). Moscow, GEOS, 2003. 402 p. (In Russian)
12. Häntzschel W. Suppl. 1: Trace fossils and problematica, 2nd ed. (revised and enlarged). In: Teichert C. (Ed.) *Treatise on Invertebrate Paleontology*. Part W: Miscellaneous. Boulder, CO, Lawrence, KS, Geol. Soc. Am. and Univ. of Kansas, 1975. 269 p.
13. Miller M.F. Morphology and paleoenvironmental distribution of Paleozoic *Spirophyton* and *Zoophycos*: Implications for the *Zoophycos* ichnofacies. *PALAIOS*, 1991, vol. 6, no. 4, pp. 410–425. <https://doi.org/10.2307/3514966>.
14. Emig C.C., Gall J.-C., Pajaud D., Plaziat J.-C. Réflexions critiques sur l'écologie et la systématique des Lingules actuelles et fossiles. *Geobios*, 1978, vol. 11, no. 5, pp. 573–609. [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(78\)80001-1](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(78)80001-1). (In French)
15. Thayer C.W., Steele-Petrovič H.M. Burrowing of the lingulid brachiopod *Glottidia pyramidata*: Its ecologic and paleoecologic significance. *Lethaia*, 1975, vol. 8, no. 3, pp. 209–221. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.1975.tb00925.x>.
16. Zonneveld J.-P., Pemberton S.G. Ichnotaxonomy and behavioral implications of lingulide-derived trace fossils from the Lower and Middle Triassic of Western Canada. *Ichnos*, 2003, vol. 10, no. 1, pp. 25–39. <https://doi.org/10.1080/10420940390238249>.

17. Zonneveld J.-P., Beatty T.W., Pemberton S.G. Lingulide brachiopods and the trace fossil *Lingulichmus* from the Triassic of Western Canada: Implications for faunal recovery after the end-Permian mass extinction. *PALAIOS*, 2007, vol. 22, no. 1, pp. 74–97. <https://doi.org/10.2110/palo.2005.p05-103r>.
18. Kowalewski M., Demko T.M. Trace fossils and population paleoecology: Comparative analysis of size-frequency distributions derived from burrows. *Lethaia*, 1996, vol. 29, no. 2, pp. 113–124. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3931.1996.tb01867.x>.
19. Silantiev V.V., Miftakhutdinova D.N., Zharinova V.V., Urazaeva M.N. Evidence for soft-bodied organisms and invertebrate soft tissues in mudstones of the Timanian Horizon (Devonian, Frasnian) of the Southern Tatarian Dome (East European Platform). In: *Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting 2021: Abstract Volume*. Kazan, Kazan Univ. Press, 2021, p. 55.

Для цитирования: Мифтахутдинова Д.Н. Применение ихнофоссилий для корреляции нефтеносных отложений терригенного девона (пашийский и тиманский горизонты) Южно-Татарского свода // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 688–700. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.688-700>.

For citation: Miftakhutdinova D.N. Using ichnofossils to correlate oil-bearing deposits in the Devonian clastic succession (Pashyan and Timanian Horizons) of the South Tatar Arch. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 688–700. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.688-700>. (In Russian)