

**SHARED RESEARCH FACILITIES "PETROPHYSICS, GEOMECHANICS AND PALEOMAGNETISM" OF THE SCHMIDT INSTITUTE OF PHYSICS OF THE EARTH RAS**

R.V. Veselovskiy <sup>1</sup>✉, N.V. Dubinya <sup>1</sup>, A.V. Ponomarev <sup>1</sup>, I.V. Fokin <sup>1</sup>, A.V. Patonin<sup>2</sup>, A.M. Pasenko <sup>1</sup>,  
A.M. Fetisova <sup>1</sup>, M.A. Matveev<sup>1</sup>, N.A. Afinogenova <sup>2</sup>, D.V. Rud'ko <sup>1</sup>, A.V. Chistyakova <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

<sup>2</sup> Borok Geophysical Observatory of the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 142, Borok 152742, Russia

**ABSTRACT.** Shared Research Facilities "Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism", created based on actively developing divisions of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, has advanced research equipment and unique methods, which determines the possibility of solving a wide range of applied and fundamental problems in Earth sciences. The main activities of the Shared Research Facilities "Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism" are in the field of geomechanical modelling and petrophysics, paleomagnetism, rock magnetism and applied analytical studies of the composition and structure of minerals, rocks and materials. The research results carried out at the Center are used to solve actual problems of prospecting and exploration of oil and gas basins, mineral deposits, tectonics, global geodynamics and tectonophysics. The article presents the scientific equipment of the Center and its key characteristics, describes the methodological and analytical capabilities, and the most significant results of research groups.

**KEYWORDS:** paleomagnetism; archeomagnetism; rock magnetism; tectonophysics; geomechanics; petrophysics; borehole core studies; geodynamics; tectonics

**FUNDING:** The equipment of the Shared Research Facilities, partially purchased with the funds of the megagrant of the Government of the Russian Federation 14.Z50.31.0017 and the "Science" National Program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, is used for state assignment performance.

**REVIEW**

Received: December 9, 2021

Revised: January 11, 2022

Accepted: January 20, 2022

**Correspondence:** Roman V. Veselovskiy, [roman.veselovskiy@ya.ru](mailto:roman.veselovskiy@ya.ru)

**FOR CITATION:** 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., 2022. Shared Research Facilities "Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism" of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0579. doi:10.5800/GT-2022-13-2-0579

## ЦЕНТР КОЛЛЕКТИВНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ ЗЕМЛИ им. О.Ю. ШМИДТА РАН «ПЕТРОФИЗИКА, ГЕОМЕХАНИКА И ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ»

Р.В. Веселовский<sup>1</sup>, Н.В. Дубиня<sup>1</sup>, А.В. Пономарёв<sup>1</sup>, И.В. Фокин<sup>1</sup>, А.В. Патонин<sup>2</sup>, А.М. Пасенко<sup>1</sup>,  
А.М. Фетисова<sup>1</sup>, М.А. Матвеев<sup>1</sup>, Н.А. Афиногенова<sup>2</sup>, Д.В. Рудько<sup>1</sup>, А.В. Чистякова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

<sup>2</sup> Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, 152742, п. Борок, 142, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Центр коллективного пользования «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм», созданный на базе активно развивающихся структурных подразделений Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ЦКП ИФЗ РАН), имеет в своем распоряжении передовое научно-исследовательское оборудование и уникальные методики, что определяет возможность решения широкого спектра прикладных и фундаментальных задач в сфере наук о Земле на высоком мировом уровне. Основные направления деятельности ЦКП ИФЗ РАН лежат в области геомеханического моделирования и петрофизики, палеомагнетизма, петромагнетизма и комплексных прикладных аналитических исследований состава и структуры минералов, горных пород и материалов. Результаты проводимых в ЦКП ИФЗ РАН исследований используются для решения актуальных задач поиска, разведки и добычи горючих и рудных полезных ископаемых, тектоники, глобальной геодинамики и тектонофизики. В статье представлено оборудование ЦКП ИФЗ РАН и его ключевые характеристики, приводится описание методических и аналитических возможностей, а также наиболее значимые результаты рабочих групп.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** палеомагнетизм; археомагнетизм; петромагнетизм; тектонофизика; геомеханика; петрофизика; исследования керна скважин; геодинамика; тектоника; центр коллективного пользования

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Приборный парк ЦКП ИФЗ РАН частично сформирован за счет средств мегагранта Правительства РФ 14.Z50.31.0017 и Программы обновления приборной базы, реализуемой Минобрнауки РФ в рамках национального проекта «Наука», и используется при выполнении государственных заданий ИФЗ РАН.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Центр коллективного пользования «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» (ЦКП ИФЗ РАН) был организован в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН в феврале 2021 г. на базе таких структурных подразделений, как центр петрофизических и геомеханических исследований, лаборатория главного геомагнитного поля и петромагнетизма, лаборатория археомагнетизма и эволюции главного геомагнитного поля, лаборатория тектоники и геодинамики, лаборатория физики землетрясений и неустойчивости горных пород, лаборатория фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга, лаборатория палеомагнетизма и физико-химических свойств горных пород (Геофизическая обсерватория «Борок»). Основу ЦКП ИФЗ РАН составляет передовое оборудование, современные, в том числе уникальные, методики и высококвалифицированные сотрудники, что позволяет решать широкий спектр задач в области геофизики, геологии и смежных наук о Земле. Разработаны и утверждены методики выполнения измерений, все приборы проходят периодическую поверку или калибровку. Сотрудники Центра принимают активное участие в научных и производственных мероприятиях, выставках. Результаты исследований публикуются в высокорейтинговых российских и зарубежных изданиях, составляют основу производственных отчетов. Заказчиками работ в разное время выступали такие организации, как МГУ им. М.В. Ломоносова,

«Роснефть», «Лукойл», «Башнефть», «Газпромнефть», «Новатэк», «НорНикель», а также институты Российской академии наук. Сотрудники Центра проводят обучение работе на оборудовании, организуют научные семинары, конференции и лекции выдающихся ученых.

### 2. НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЦКП

Исследования в ЦКП ИФЗ РАН носят мультидисциплинарный характер и проводятся по нескольким генеральным направлениям: (1) геомеханическое моделирование и петрофизика, (2) палеомагнетизм и петромагнетизм, (3) комплексные прикладные аналитические исследования состава и структуры минералов, горных пород и материалов. Главными задачами, которые решают рабочие группы ЦКП ИФЗ РАН, являются:

- (1) изучение закономерностей и механизмов деформирования горных пород в различных условиях;
- (2) проведение лабораторных исследований в области физики очага землетрясения и моделирования переходных режимов сейсмичности;
- (3) изучение фильтрационно-емкостных, упругих и прочностных свойств горных пород в различных термобарических условиях;
- (4) определение элементного и вещественного состава минералов и горных пород, а также их микроструктуры;
- (5) изучение керна скважин и образцов горных пород в целях петрофизического и геомеханического моделирования в приложении к задачам разведки, освоения

и разработки месторождений углеводородов и твердых полезных ископаемых;

(6) разработка и оптимизация стандартизированных методов определения фильтрационно-емкостных, физико-механических и прочностных параметров горных пород в термобарических условиях пласта и в атмосферных условиях;

(7) проведение палеомагнитных, магнитостратиграфических и археомагнитных исследований в рамках разработки актуальных проблем эволюции геомагнитного поля, тектоники, стратиграфии, палеогеографии, палеоклиматологии, археологии и других наук о Земле;

(8) определение магнитных свойств минералов, горных пород и материалов (петромагнетизм);

(9) выполнение термохронологических исследований методом трекового анализа апатита.

### 3. ПРИБОРНАЯ БАЗА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДИКИ

ЦКП ИФЗ РАН имеет в своем распоряжении самое современное лабораторное оборудование, которое позволяет решать сложные и наукоемкие задачи в обозначенных направлениях исследований. Перечень приборов Центра приведен в табл. 1; получить актуальную

информацию о приборно-методической базе и исследованиях, проводимых в ЦКП ИФЗ РАН, можно на сайтах <https://ifz.ru/nauka/ckp> или <https://ckp-rf.ru/ckp/1860853/>.

Ниже кратко охарактеризованы методики и оборудование, используемые при проведении исследований по основным направлениям деятельности ЦКП ИФЗ РАН.

**Геомеханика и петрофизика.** Лабораторные эксперименты позволяют осуществлять исследования закономерностей разрушения геоматериалов и их моделей при целенаправленных вариациях параметров напряженно-деформированного состояния среды и ее физических свойств. Ряд проявлений естественной и инициированной сейсмичности, а также модели подготовки землетрясений были получены и изучены именно на основе анализа лабораторных экспериментов [Sobolev, Ponomarev, 2003; Smirnov, Ponomarev, 2020].

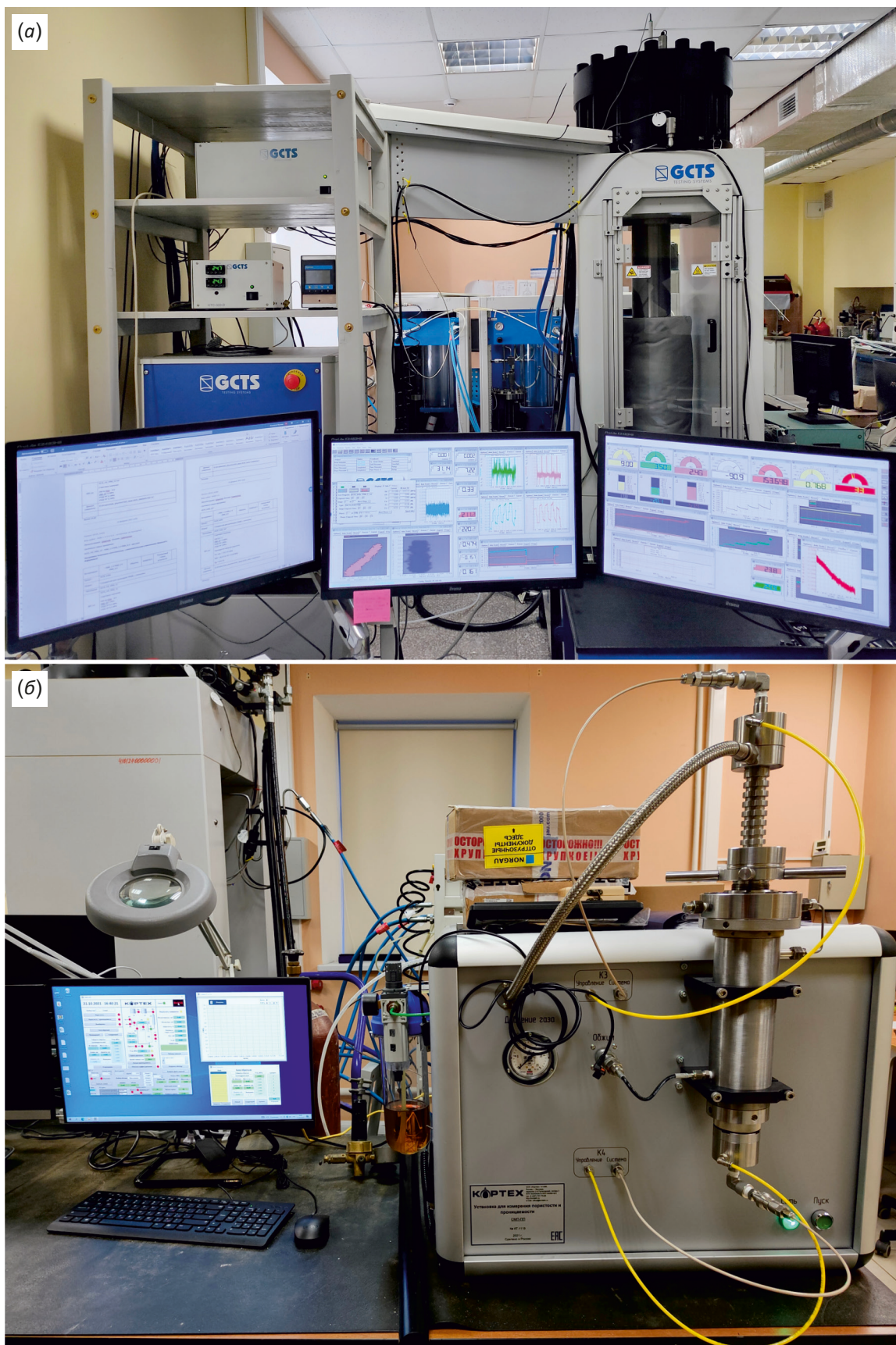
В рамках направления изучения механических свойств и внутренней структуры горных пород основные исследования проводятся с использованием сервогидравлических испытательных установок (табл. 1; рис. 1, а). Данные установки дают возможность исследовать механическое поведение образцов горных пород,

**Таблица 1.** Ключевое оборудование ЦКП «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» ИФЗ РАН

**Table 1.** Key equipment of the Centre for Petrophysics, Geomechanics and Paleomagnetism IPE RAS

Наименование прибора и его назначение	Страна, фирма-изготовитель	Год выпуска
Геомеханика и петрофизика		
Сервогидравлическая испытательная установка Inova ZUZ 1000	Чехия, Inova	1975
Сервогидравлическая испытательная установка GCTS RTR4500	США, GCTS Testing Systems	2013
Установка для измерения пористости и проницаемости СМП-ПП	Россия, ООО «Кортех»	2021
Модульная система регистрации и обработки высокочастотных и низкочастотных сигналов National Instruments PXI	США, National Instruments	2020
Палеомагнетизм и петромагнетизм		
Криогенный (SQUID) магнитометр вертикальной ориентации с интегрированной установкой размагничивания/намагничивания образцов и роботизированной системой подачи образцов	США, 2G Enterprises	2012
Вибромагнитометр (VSM) PMC MicroMag 3900 с печкой	США, Lakeshore Cryotronics	2015
Спин-магнитометры JR-6 (3 шт.)	Чехия, AGICO	2009
Каппометр (каппабридж) MFK1-FA с приставкой-печью CS3 и приставкой-охладителем CS-L	Чехия, AGICO	2016
Немагнитная печь MMTD80 (2 шт.)	Англия, Magnetic Measurements	2016
Демагнетайзер LDA5 с магнетайзером PAM1	Чехия, AGICO	2020
Трехкомпонентный термомагнитометр «ОРИОН»	Россия, ГО «Борок»	2018
Комплексные аналитические исследования горных пород, минералов и материалов		
Сканирующий электронный микроскоп TESCAN MIRA LMS (четвертое поколение)	Чехия, TESCAN	2021
Микроскоп Olympus BX53M с камерой	США, Olympus	2018
Рамановский анализатор EnSpectr R532	Россия, ООО «Спектр-М»	2020
Портативный рентгенофлуоресцентный (XRF) анализатор Olympus Vanta M с родиевым анодом	США, Olympus	2020
Автоматический рентгеновский дифрактометр STOE STADI MP	Германия, STOE	2008
Комплекс пробоподготовки: станки шлифовально-полировальный ПОЛИЛАБ П22СБ и отрезной ПОЛИЛАБ Р100А	Россия, ООО «Кемика»	2021





**Рис. 1.** Оборудование для геомеханических испытаний: сервогидравлическая установка GCTS RTR4500 для проведения испытаний на псевдотрехосное сжатие (а) и установка для измерения пористости и проницаемости СМП-ПП (б).

**Fig. 1.** Equipment for geomechanic studies: servo-hydraulic unit GCTS RTR4500 for testing pseudo-triaxial compression (a) and unit for measuring porosity and permeability SMP-PP (b).

помещенных в условия псевдотрехосного и истинно трехосного сжатия. Важной особенностью используемого лабораторного комплекса является широкий диапазон нагрузок, которые могут быть достигнуты при нагружении: радиальное напряжение от 0.5 до 210 МПа, вертикальное напряжение от 0.5 до 1200 МПа. Такие значения напряжений позволяют исследовать механическое поведение образцов горных пород в условиях, максимально приближенных к условиям залегания. Этому способствуют возможности проводить испытания по трехосному сжатию образцов горных пород при температуре от 25 до 200 °С и в условиях насыщения водой или пластовым флюидом при давлении до 210 МПа. Используя возможность выполнения исследований на насыщенных образцах, сотрудники ЦКП ИФЗ РАН проводят эксперименты по определению взаимосвязи между фильтрационно-емкостными свойствами породы и особенностями ее напряженно-деформированного состояния.

Измерительная система GCTS-ULT 100 позволяет экспериментально определять скорости распространения продольных и поперечных упругих волн вдоль оси образца, помещенного в обстановку псевдотрехосного сжатия. В результате оцениваются не только статические, но и динамические упругие модули образцов. Таким образом, связь между статическими и динамическими упругими модулями, необходимая при решении многих задач геомеханики и петрофизики [Tikhotsky et al., 2017], может быть исследована для различных условий нагружения. Экспериментальная система позволяет также определять связь динамических и текущих статических упругих модулей породы, находящейся в области неупругого деформирования.

Особенностью экспериментальной системы GCTS RTR4500 является наличие истинно трехосной ячейки: образцы, имеющие форму параллелепипеда, помещаются в напряженное состояние, в котором все три главных напряжения отличны друг от друга. Проведение экспериментов в условиях истинно трехосного сжатия позволяет определять роль промежуточного главного напряжения в изменении механических и фильтрационно-емкостных свойств горных пород.

Исследование механических свойств образцов горных пород также проводится с помощью испытательного комплекса Inova ZUZ 1000 (табл. 1). В этой установке значительное внимание уделено регистрации сигналов акустической эмиссии, возникающей в процессе хрупкого разрушения породы, поскольку акустическую эмиссию и естественную сейсмичность роднит общий физический базис – оба явления вызваны динамическим развитием разрывов в твердом веществе. В отличие от системы GCTS-ULT 100, используемой для определения скоростей продольных и поперечных волн, проходящих по оси нагруженного цилиндрического образца, измерительная система, разработанная сотрудниками ИФЗ РАН [Patonin, 2006; Patonin et al., 2013; Bayuk et al., 2015], позволяет исследовать распространение упругих волн в радиальных направлениях. Такие

исследования дают возможность изучать анизотропию динамических упругих свойств образцов.

Помимо перечисленных уникальных экспериментальных установок, ЦКП ИФЗ РАН располагает комплексом аппаратуры для исследования фильтрационно-емкостных свойств образцов пород в атмосферных условиях (табл. 1; рис. 1), что позволяет определять следующие механические и фильтрационно-емкостные свойства:

1) статические и динамические упругие модули образцов пород в атмосферных и термобарических условиях по стандартным методикам;

2) пределы прочности на одноосное растяжение (методом Бразильского теста) и одноосное сжатие;

3) прочность образца породы по результатам многостадийного теста на псевдотрехосное сжатие [Tikhotsky et al., 2017];

4) проницаемость образца породы, помещенного в обстановку псевдотрехосного и истинно трехосного сжатия;

5) параметры ползучести образцов при длительных испытаниях;

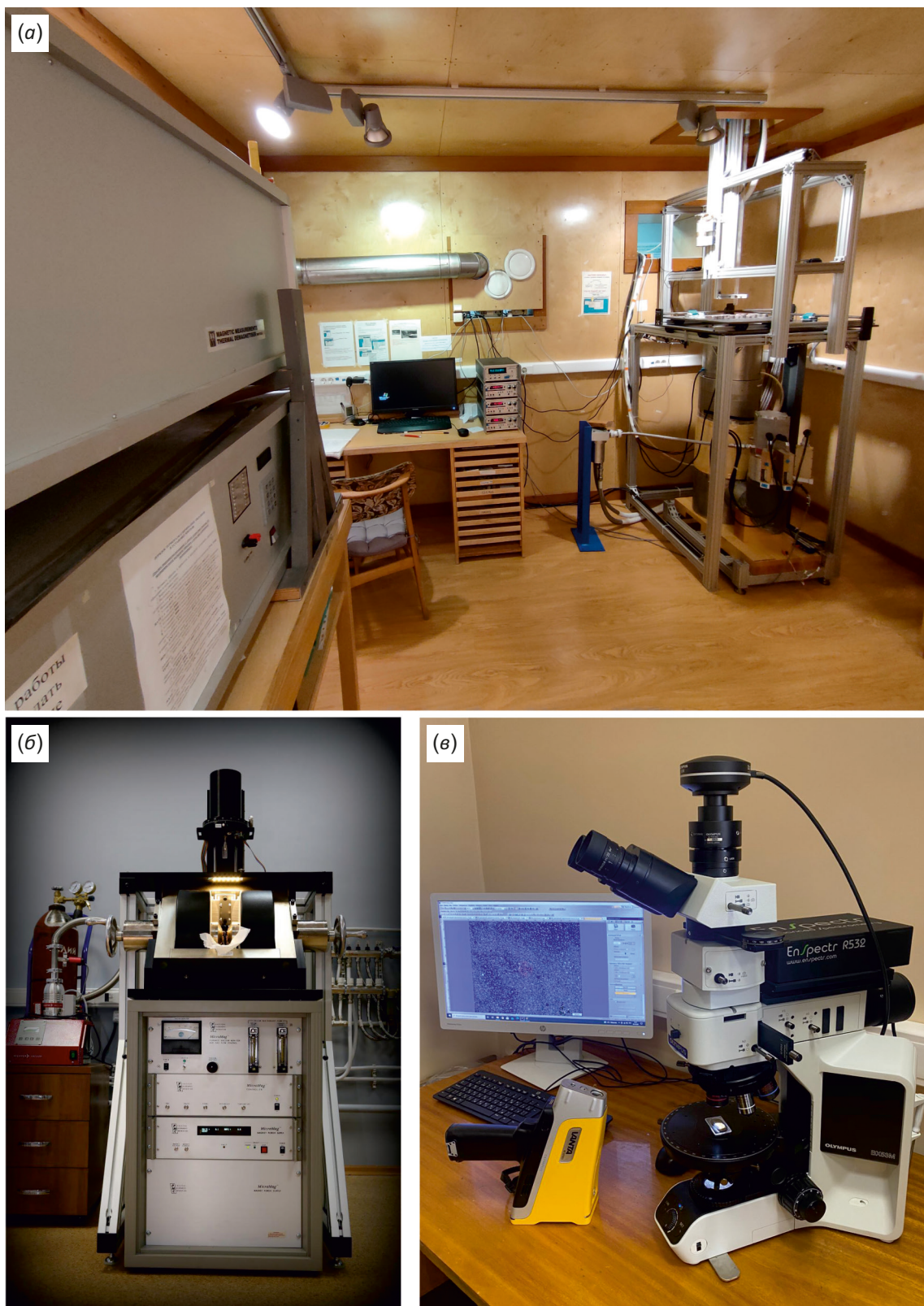
6) пороупругий коэффициент (компоненты тензора пороупругости) Био-Виллиса.

Широкие диапазоны параметров проведения экспериментов дают возможность изучать образцы горных пород с разной глубины с учетом особенностей их естественного залегания.

**Палеомагнетизм и петромагнетизм.** В рамках данного направления уникальным лабораторным оборудованием является единственный в России криогенный SQUID-магнитометр вертикальной конструкции (табл. 1; рис. 2, а), позволяющий проводить измерения остаточной намагниченности (магнитного момента) слабомагнитных образцов горных пород и синтетических материалов без каких-либо требований к форме и агрегатному состоянию. Магнитометр совмещен с демагнетайзером, магнетайзером и измерителем магнитной восприимчивости, что дает возможность проводить комплекс палеомагнитных и петромагнитных исследований коллекции объемом до 99 образцов в полностью автоматическом режиме, среди наиболее востребованных из которых магнитная чистка переменным магнитным полем с максимальной амплитудой 130 мТл, создание в образце нормальной (IRM) и идеальной (ARM) намагниченности. Магнитометр и вспомогательное оборудование расположены в немагнитной комнате площадью 12 м<sup>2</sup>, экранирующей внешние магнитные поля (рис. 2, а). Немагнитные печи MMTD80 и MMTD24 (табл. 1; рис. 2, а) служат для температурных чисток до 800 °С, а также для экспериментов по созданию в образцах парциальной термоостаточной намагниченности, что необходимо при реализации методов оценки палеонапряженности.

ЦКП ИФЗ РАН располагает комплексом аппаратуры для проведения петро- и палеомагнитных исследований, который включает в себя спин-магнитометры (измерители остаточной намагниченности), каппаметры





**Рис. 2.** Комплекс для палеомагнитных и петромагнитных исследований и изучения состава горных пород и минералов. (а) – немагнитная комната с криогенным магнитометром (справа) и немагнитными печами (слева); (б) – вибромагнитометр VSM PMC 3900; (в) – прямой оптический микроскоп Olympus BX53M с рамановским анализатором EnSpectr R532 и портативный XRF-анализатор элементного состава Olympus Vanta M.

**Fig. 2.** Complex for paleomagnetic and petromagnetic studies and study of the composition of rocks and minerals. (а) – non-magnetic room with a cryogenic magnetometer (right) and non-magnetic furnaces (left); (б) – vibromagnetometer VSM PMC 3900; (в) – Olympus BX53M optical microscope with EnSpectr R532 Raman analyzer and Olympus Vanta M portable XRF elemental composition analyzer.

(измерители магнитной восприимчивости и ее анизотропии), весы Кюри, вибромагнитометр и др. (табл. 1). Высокочувствительный вибрационный магнитометр VSM 3900 (рис. 2, б) позволяет не только проводить стандартные измерения гистерезисных параметров, но также строить FORC и remFORC диаграммы. Вибромагнитометр укомплектован системой вращения образца, что дает возможность проводить эксперименты по изучению анизотропии магнитных свойств. Для измерения температурных зависимостей петромагнитных параметров используется приставка-печь с возможностью нагрева образца до температуры 900 °С. Размагничивающая установка LDA5, совместно с приставкой безгистерезисного и импульсного намагничивания PAM1, обеспечивает воздействие постоянными (до 500 мкТл) и переменными (до 200 мТл) магнитными полями на образец во всех направлениях.

В ЦКП ИФЗ РАН проводятся эксперименты с использованием собственных уникальных методических и аппаратных разработок. В Геофизической обсерватории (ГО) «Борок» (филиал ИФЗ РАН) разработан уникальный трехкомпонентный термомагнитометр «ОРИОН» [Smirnov et al., 2019] (табл. 1), который не имеет аналогов в мире и позволяет выполнять рутинные эксперименты по оценке напряженности магнитного поля Земли в прошлом в автоматическом режиме, а также проводить непрерывную температурную магнитную чистку образцов до температуры 750 °С. В ГО «Борок» также разработана оригинальная многоканальная система регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ), которая включает станцию ультразвукового зондирования образцов по 16 направлениям и модуль непрерывной записи потока АЭ с частотой оцифровки 2.5 МГц на канал. Использование сервоуправляемого пресса, снабженного специализированной системой нагружения с управлением скоростью нагружения в зависимости от интенсивности акустической эмиссии, обеспечивает лучшее соблюдение критериев подобия в экспериментах [Patonin et al., 2013, 2018].

**Комплексные прикладные аналитические исследования горных пород, минералов и материалов.** Основным инструментом для изучения минерального состава горных пород и идентификации различных веществ является прямой оптический микроскоп Olympus BX53M с цифровой камерой высокого разрешения, оборудованный приставкой EnSpectr R532 (табл. 1; рис. 2, в) для экспресс-анализа веществ методом спектроскопии комбинационного рассеяния (рамановская спектроскопия). Рамановский спектрометр позволяет проводить экспресс-идентификацию веществ и исследование фазового состояния *in situ*; анализ проводится для кристаллических, аморфных, жидких и газообразных веществ, неорганических и органических, прозрачных и непрозрачных. В область применения рамановской спектроскопии входит контроль чистоты отбора зерен определенного минерала для изотопных, рентгеновских и других видов исследований; анализ полиморфных фаз и степени кристалличности вещества, в

том числе в рамках выявления событий простого термического отжига циркона. Микроскоп оборудован прецизионным предметным столиком для подсчета треков спонтанного деления урана в апатите и цирконе при проведении трекового (fission-track) анализа и датирования.

Многофункциональный дифрактометр STADI-MP дает возможность методом порошковой рентгеновской дифракции на порошке или поликристаллическом образце исследуемого материала изучать его фазовый состав и кристаллическую структуру (определение пространственной группы элементарной ячейки, ее размеров и формы, группы симметрии кристалла), а также проводить оценку микронапряжений кристаллической решетки, размера зерен поликристаллов и блоков мозаичной структуры, исследовать текстуру вещества на основе анализа зависимости интенсивности дифрагированного излучения от угла рассеяния. Достоинствами этого метода являются использование малого количества анализируемого вещества, упрощенная пробоподготовка, сохранение образцов в неизменном состоянии в процессе анализа.

Научное оборудование для элементного анализа представлено сканирующим электронным микроскопом (СЭМ) TESCAN MIRA LMS и портативным рентгенофлуоресцентным (XRF) анализатором Olympus Vanta M с родиевым анодом (табл. 1; рис. 2, в).

СЭМ с автоэмиссионным катодом Шоттки TESCAN MIRA LMS, который существенно расширяет возможности его предшественника – СЭМ TESCAN VEGA II LMU, находящегося в эксплуатации с 2004 года в ГО «Борок», имеет диапазон увеличений от 2 до 1000000 раз и оборудован энергодисперсионным (EDX) спектрометром Ultim Max 65 с интегрированным программным обеспечением AZtecLive Automated с возможностью определения элементов от бериллия (4) до калифорния (98), а также детекторами вторичных электронов (SE), обратноотраженных электронов (BSE) и детектором катодolumинесценции (CL) с расширенным спектральным диапазоном 185–850 нм. Отличительной особенностью СЭМ является наличие опции SingleVac – режима низкого вакуума (30±10 Па) для исследования непроводящих образцов в их естественном состоянии.

Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА, XRF) – неразрушающий метод количественного определения элементного состава материалов. РФА-анализатор Olympus Vanta M (табл. 1; рис. 2, в) позволяет определять элементы от Mg до U в концентрациях от первых промилле. Определение абсолютных и относительных концентраций различных элементов в горных породах помогает успешно решать широкий спектр задач, в том числе при палеоклиматических исследованиях.

#### **4. НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ РАБОЧИМИ ГРУППАМИ ЦКП ИФЗ РАН**

**Геомеханика и петрофизика.** В ЦКП ИФЗ РАН разработана и реализована методика построения модели



механических свойств массива горных пород по результатам разномасштабных исследований [Dubinya et al., 2017]. Несмотря на то, что даже одни и те же механические свойства горных пород, измеренные в масштабах лабораторных исследований керна и сейсморазведки, могут значительно отличаться, специальные подходы позволяют учесть этот эффект при решении таких задач, как прогноз статических упругих модулей по сейсмическим данным [Bayuk, Tikhotskiy, 2018].

Отдельное внимание уделяется неупругому деформированию горных пород. Проведенные эксперименты привели к созданию и апробации математической модели неупругого деформирования, в рамках которой результаты экспериментов по псевдотрехосному сжатию используются для реконструкции пластического потенциала породы [Garagash et al., 2018].

Особенности используемых в ЦКП ИФЗ РАН установок по исследованию механических свойств горных пород дали возможность детально изучить процессы неупругого деформирования и трещинообразования с разных позиций. В частности, выполнены исследования так называемых критически напряженных трещин – естественных трещин сдвига, находящихся в состоянии, при котором незначительное увеличение сдвигового напряжения, действующего на них, приводит к росту трещин [Dubinya et al., 2018].

Детальные лабораторные и теоретические исследования процессов трещинообразования позволили создать методику построения модели трещиноватости массива горных пород по результатам петроупругого и геомеханического моделирования [Bayuk et al., 2019]. В результате применения разработанного подхода данные сейсморазведки, геофизических исследований скважин и лабораторных экспериментов могут быть использованы для создания модели, способной предсказывать, в каких зонах массива горных пород образуются трещины, при каких напряжениях и в каких количествах они возникнут, каковы будут их линейные размеры и пространственные ориентации. Такая модель применима для решения многих проблем геомеханики месторождений углеводородов и твердых полезных ископаемых, а комплекс оборудования ЦКП ИФЗ РАН дает возможность выполнять необходимые эксперименты для создания и верификации указанной модели: например, верификация может быть выполнена на основании результатов исследования акустической эмиссии образцов [Tikhotskiy et al., 2017].

Понимание взаимосвязи фильтрационно-емкостных свойств образцов горных пород, отобранных на месторождениях нефти и газа, с их напряженно-деформированным состоянием позволяет решать ряд задач геомеханики месторождений углеводородов, в частности прогнозировать изменение проницаемости пород-коллекторов по мере добычи. Установка GCTS RTR4500 позволяет решать задачи по выявлению связи между проницаемостью образца и его напряженно-деформированным состоянием как в упругой, так и в неупругой области [Fokin et al., 2020].

В ходе выполнения договорных работ по заказам компаний топливно-энергетического комплекса были разработаны методические рекомендации и подходы, например рекомендации по выбору методики определения прочностных свойств для решения задачи анализа устойчивости ствола скважины при бурении [Dubinya et al., 2020]. Схожие рекомендации были разработаны и для определения упругих свойств: многочисленные эксперименты по псевдотрехосному и истинно трехосному сжатию подтвердили существенную нелинейность реологических свойств горных пород.

**Палеомагнетизм и петромагнетизм.** По результатам палео- и петромагнитного изучения эффузивных и интрузивных магматических комплексов Норильского района сотрудниками ЦКП ИФЗ РАН создана уникальная палеомагнитная база данных вековых вариаций магнитного поля на рубеже палеозоя и мезозоя [Pavlov et al., 2019]. На ее основе выполнена корреляция рудоносных интрузивных тел и лавовой толщи Норильского района [Latyshev et al., 2020]. Благодаря междисциплинарным исследованиям докембрийских интрузивных комплексов Кольского полуострова был вычислен ключевой палеомагнитный полюс для Мурманского кратона Фенноскандии и оценена напряженность геомагнитного поля 1.86 млрд лет назад [Veselovskiy et al., 2019]. Значительные результаты достигнуты в решении фундаментальной задачи разработки шкал магнитной полярности для различных интервалов геологического времени, в том числе для раннего палеозоя [Pavlov, Gallet, 2020] и границы палеозоя и мезозоя [Fetisova et al., 2020]; интенсивно исследуется палеомагнетизм поздне меловых вулканических толщ Чукотки [Lebedev et al., 2021]. С целью изучения тонкой структуры (вековых вариаций) геомагнитного поля проводятся археомагнитные исследования [Troyano et al., 2021] и палеомагнитные исследования спелеотемов – натечных образований пещер [Gavryushkin et al., 2022].

Сотрудниками ЦКП ИФЗ РАН получены важные результаты, характеризующие геодинамику и палеогеографию Сибирской платформы и ее обрамления, Колымо-Омолон-Чукотского континентального блока, выполнена проверка гипотезы вхождения Сибирского кратона в состав докембрийского суперконтинента [Pavlov, Shatsillo, 2015; Pasenko, 2021]. Яркие результаты были получены при изучении эволюции геомагнитного поля на рубеже докембрия и фанерозоя: показано, что конфигурация магнитного поля Земли в то время могла существенно отличаться от современной [Pasenko et al., 2020; Pavlov et al., 2018; Shatsillo et al., 2020]. В своих исследованиях сотрудники ЦКП ИФЗ РАН активно используют методы изотопной геохронологии и термохронологии [Myshenkova et al., 2020].

**Комплексные прикладные аналитические исследования горных пород, минералов и материалов.** При помощи сканирующей электронной и оптической микроскопии проведено изучение структур и составов (минерального и химического) различных типов



сейсмиков – зеркал и борозд скольжения, глинок трения, катаклазитов, милонитов, псевдотахилитов, что принципиально важно для понимания процессов подготовки и механизмов реализации сейсмических событий [Morozov et al., 2018]. Были изучены и описаны две генетические разновидности псевдотахилитов, образованные преимущественно механическим измельчением породы и ее частичным плавлением. Установлено, что измельчение и фрикционное плавление – взаимосвязанные и взаимодополняющие процессы, последовательно проявленные на разных стадиях единого сейсмического цикла [Morozov et al., 2019a]. Показан фрикционный механизм формирования расплавных псевдотахилитов, а также выявлена температурно-зависимая последовательность плавления основных породообразующих минералов и порядок кристаллизации из расплава новых минеральных фаз в ходе сейсмической подвижки [Smulskaya et al., 2021]. В сейсмогенных зеркалах скольжения по терригенным породам выявлено существенное изменение минерально-фазового и химического состава в сравнении с исходным матриком, а также обнаружено проявление процессов гидролиза полевых шпатов [Morozov et al., 2019b].

С использованием дифрактометра и сканирующего электронного микроскопа решен ряд задач в области магнетизма горных пород, в том числе определение условий и последовательности вторичных изменений в связи со стабильностью различных видов остаточной намагниченности [Shcherbakov et al., 2019, 2020; Gribov et al., 2021].

Примером успешного решения палеоклиматических задач является определение длительности самого масштабного экскурса изотопного соотношения неорганического углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ) в истории Земли – «Шурам», обнаруженного в позднедокембрийских породах торгинской свиты (юг Сибирской платформы). Благодаря записи вариаций климата в осадочной летописи, изучение элементного состава карбонатов по разрезу при помощи портативного РФА-анализатора позволило выполнить корреляцию магнитной восприимчивости с циклической сменой относительно теплого и холодного климата. Характер цикличности обнаруживает связь вариаций магнитной восприимчивости с циклами Миланковича, что определяет высокую точность оценки продолжительности накопления изученной толщи в 750 тыс. лет [Rud'ko et al., 2021].

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Центр коллективного пользования «Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм» Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН располагает комплексом передового, в том числе уникального, научного оборудования. Рабочие группы ЦКП ИФЗ РАН проводят прикладные и фундаментальные исследования в различных направлениях наук о Земле, используя самые современные методы и подходы. Материально-техническая и методическая база Центра активно развивается, а достижения и спектр решаемых сотрудниками

ЦКП ИФЗ РАН задач определяют его лидирующие позиции по целому ряду направлений в отечественной и мировой науке.

## 6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

## 7. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## 8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Bayuk I.O., Beloborodov D.E., Berezina I.A., Gilyazetdinova D.R., Krasnova M.A., Korost D.V., Patonin A.V., Ponomarev A.V., Tikhotsky S.A., Fokin I.V., Khamidullin R.A., Tselmovich V.A., 2015. Elastic Properties of Core Samples under Confining Pressure. *Technologies of Seismic Prospecting* 2, 36–45 (in Russian) [Баяк И.О., Белобородов Д.Е., Березина И.А., Гилязетдинова Д.Р., Краснова М.А., Корост Д.В., Патонин А.В., Пономарёв А.В., Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Хамидуллин Р.А., Цельмович В.А. Сейсмоакустические исследования керн при пластовых условиях // Технологии сейсморазведки. 2015. № 2. С. 36–45].

Bayuk I.O., Dubinya N.V., Tikhotskiy S.A., 2019. Some Problems of Rock Physics Modeling of Fractured Carbonate Reservoir Rocks. *PRONEFT. Professionally about Oil* 13 (3), 11–17 (in Russian) [Баяк И.О., Дубиня Н.В., Тихоцкий С.А. Проблемы петроупругого моделирования трещиноватых коллекторов // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2019. Т. 13. №3. С. 11–17]. <http://doi.org/10.24887/2587-7399-2019-3-11-17>.

Bayuk I.O., Tikhotskiy S.A., 2018. Upscaling and Downscaling of Reservoir Rock Elastic Properties: Rock Physics Approach. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. Society of Exploration Geophysicists, p. 3653–3657. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2985365.1>.

Dubinya N.V., Fokin I.V., Rusina O.A., 2018. Regarding the Relationship between Bulk Modulus of a Fractured Rock Mass and Actual Stress State. *Geophysics* 3, 28–32 (in Russian) [Дубиня Н.В., Фокин И.В., Русина О.А. О связи модуля объемного сжатия трещиноватой среды с текущим напряженно-деформированным состоянием // Геофизика. 2018. № 3. С. 28–32].

Dubinya N., Tikhotsky S., Bayuk I., Beloborodov D., Krasnova, M., Makarova A., Rusina O., Fokin I., 2017. Prediction of Physical-Mechanical Properties and In-Situ Stress State of Hydrocarbon Reservoirs from Experimental Data and Theoretical Modeling. *Proceedings of the SPE Russian Petroleum Technology Conference (October 16–18, 2017, Moscow)*. Society of Petroleum Engineers, SPE-187823-RU. <https://doi.org/10.2118/187823-MS>.

Dubinya N.V., Tikhotskiy S.A., Fokin I.V., 2020. Features of Determining the Strength Properties of Anisotropic Rocks When Solving the Problem of Assessing the Stability of the Wellbore and the Recommended Density of the Drilling Mud. *Drilling and Oil* 11, 36–41 (in Russian) [Дубиня Н.В., Тихоцкий С.А., Фокин И.В. Особенности определения прочностных свойств анизотропных горных пород при решении задачи оценки устойчивости ствола скважины и рекомендуемой плотности бурового раствора // *Бурение и нефть*. 2020. № 11. С. 36–41].

Fetisova A.M., Veselovskiy R.V., Arefiev M.P., 2020. New Paleomagnetic Data on the Permian-Triassic Sedimentary Sections of the Moscow Syncline. *Proceedings of the Kazan University. Natural Sciences Series* 162 (2), 228–243 (in Russian) [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. № 2. С. 228–243]. <http://dx.doi.org/10.26907/2542-064X.2020.2.228-243>.

Fokin I.V., Dubinya N.V., Tikhotskiy S.A., 2020. A Laboratory Study on Interaction of Filtration and Deformation Processes in Saturated Rocks. In: *Proceedings of the 54th U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium* (June 26 – July 10, 2020, Golden, Colorado). American Rock Mechanics Association, p. 2154–2161. <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-2020-1185>.

Garagash I.A., Dubinya N.V., Rusina O.A., Tikhotskiy S.A., Fokin I.V., 2018. Estimation of Rock Strength Properties from Triaxial Test Data. *Geophysical Research* 19 (3), 57–72. <https://doi.org/10.21455/gr2018.3-4>.

Gavryushkin D.A., Pasenko A.M., Veselovskiy R.V., Rudko D.V., 2022. Geomagnetic Excursion Record Preserved in the Speleothem from Western Caucasus: First Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2s), 0624 (in Russian) [Гаврюшкин Д.А., Пасенко А.М., Веселовский Р.В. Первые данные о записи геомагнитного экскурса, сохраненной в спелеотеке с Западного Кавказа. *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. Т. 13. № 2s. 0624. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0624>].

Gribov S.K., Shcherbakov V.P., Tsel'movich V.A., Afinogenova N.A., 2021. Properties of the Thermochemical Remanent Magnetization Acquired by Slow Laboratory Cooling of Titanomagnetite-Bearing Basalt Samples from Different Temperatures and the Results of Application of the Thellier Method. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 6, 107–121 (in Russian) [Грибов С.К., Щербаков В.П., Цельмович В.А., Афиногенова Н.А. Свойства термохимической остаточной намагниченности, образованной при медленном лабораторном охлаждении титаномagnetитсодержащих базальтовых образцов от различных температур, и результаты применения к ней методики Теллье // *Физика Земли*. 2021. № 6. С. 107–121]. <http://dx.doi.org/10.31857/S0002333721060016>.

Latyshev A.V., Rad'ko V.A., Veselovskiy R.V., Fetisova A.M., Pavlov V.E., 2020. 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. *Economic Geology* 115 (6), 1173–1193. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4746>.

Lebedev I.E., Tikhomirov P.L., Pasenko A.M., Eid B., Lhuillier F., Pavlov V.E., 2021. New Paleomagnetic Data on Late Cretaceous Chukotka Volcanics: the Chukotka Block Probably Underwent Displacements Relative to the North American and Eurasian Plates after the Formation of the Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt? *Izvestiya. Physics of the Solid Earth* 57 (2), 232–246. <https://doi.org/10.1134/S1069351321020014>.

Morozov Yu.A., Matveev M.A., Smulskaya A.I., Kulakovskii A.L., 2019a. Two Genetic Types of Pseudotachylytes. *Doklady Earth Sciences* 484, 129–133. <https://doi.org/10.1134/S1028334X19020144>.

Morozov Yu.A., Smulskaya A.I., Kulakovskiy A.L., Matveev M.A., 2018. Structural and Material Records of Paleoearthquakes in Terrigenous Rocks: Analysis and Interpretation. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 54, 1–21. <https://doi.org/10.1134/S1069351318010111>.

Morozov Yu.A., Smulskaya A.I., Kulakovskiy A.L., Matveev M.A., 2019b. Structural and Material Transformations of the Old Red Sandstones in the Seismic Slickensides. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS. Vol. 16. P. 388–392* (in Russian) [Морозов Ю.А., Смусьская А.И., Кулаковский А.Л., Матвеев М.А. Структурно-вещественные преобразования красноцветного песчаника в сейсмогенном зеркале скольжения // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2019. Т. 16. С. 388–392]. <https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.078>.

Myshenkova M.S., Zaitsev V.A., Thomson S., Latyshev A.V., Zakharov V.S., Bagdasaryan T.E., Veselovsky R.V., 2020. Thermal History of the Guli Pluton (North of the Siberian Platform) According to Apatite Fission-Track Dating and Computer Modeling. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (1), 75–87 (in Russian) [Мышенкова М.С., Зайцев В.А., Томсон С., Латышев А.В., Захаров В.С., Багдасарян Т.Э., Веселовский Р.В. Термальная история Гулинского плутона (север Сибирской платформы) по результатам трекового датирования апатита и компьютерного моделирования // *Геодинамика и тектонофизика*. 2020. Т. 11. № 1. С. 75–87. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-1-0464>].

Pasenko A.M., 2021. Paleomagnetism of the Mesoproterozoic Rocks of the Northeast of the Siberian Platform. Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Moscow, 24 p. (in Russian) [Пасенко А.М. Палеомагнетизм мезопротерозойских пород северо-востока Сибирской платформы: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2021. 24 с.].

Pasenko A.M., Malyshev S.V., DuFrane S.A., Shatsillo A.V., 2020. Paleomagnetism and Provenance of the Lower Cambrian Sedimentary Rocks of the Udzha Uplift (North of the Siberian Platform). *Vestnik Saint Petersburg University. Earth Sciences* 65 (3), 552–576 [Пасенко А.М., Малышев С.В., Дюфрейн С.Э., Шацилло А.В. Палеомагнетизм и источники сноса нижнекембрийских отложений Удзинского поднятия (север Сибирской платформы) // *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*. 2020. Т. 65. № 3. С. 552–576]. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.308>.

Patonin A.V., 2006. Geophysical Complex Inova: Procedure and Equipment for Laboratory Experiment. *Seismic Instrument* 42, 37–48 (in Russian) [Патонин А.В. Геофизический комплекс INOVA: методика и техника лабораторного эксперимента // Сейсмические приборы. 2006. Т. 42. С. 37–48].

Patonin A.V., Ponomarev A.V., Smirnov V.B., 2013. Laboratory Instrumental Complex for Studying the Physics of Rock Failure. *Seismic Instrument* 49 (1), 19–34 (in Russian) [Патонин А.В., Пономарёв А.В., Смирнов В.Б. Аппаратно-программный лабораторный комплекс для решения задач физики разрушения горных пород // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 1. С. 19–34].

Patonin A.V., Shikhova N.M., Ponomarev A.V., Smirnov V.B., 2018. Module System of Continuous Acoustic Emission Registration for Laboratory Studies of the Rocks Destruction Processes. *Seismic Instrument* 54 (3), 35–55 (in Russian) [Патонин А.В., Шихова Н.М., Пономарёв А.В., Смирнов В.Б. Модульная система непрерывной регистрации акустической эмиссии для лабораторных исследований разрушения горных пород // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54. № 3. С. 35–55]. <https://doi.org/10.21455/si2018.3-3>.

Pavlov V.E., Fluteau F., Latyshev A.V., Fetisova A.M., Elkins-Tanton L.T., Black B.A., Burgess S.D., Veselovskiy R.V., 2019. Geomagnetic Secular Variations at the Permian-Triassic Boundary and Pulsed Magmatism during Eruption of the Siberian Traps. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 20 (2), 773–791. <https://doi.org/10.1029/2018GC007950>.

Pavlov V.E., Gallet Y., 2020. Developing the Cambrian and Ordovician Magnetic Polarity Time Scale: Current Data and Attempt of Synthesis. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 56, 437–460. <https://doi.org/10.1134/S1069351320040072>.

Pavlov V.E., Pasenko A.M., Shatsillo A.V., Powerman V.I., Malyshev S.V., Shcherbakova V.V., 2018. Systematics of Early Cambrian Paleomagnetic Directions from the Northern and Eastern Regions of the Siberian Platform and the Problem of an Anomalous Geomagnetic Field in the Time Vicinity of the Proterozoic – Phanerozoic Boundary. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 54, 782–805. <https://doi.org/10.1134/S1069351318050117>.

Pavlov V.E., Shatsillo A.V., 2015. Place of Birth of the Siberian Platform. *Doklady Earth Sciences* 462, 444–448. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15050177>.

Rud'ko D., Rud'ko S., Shatsillo A., Pokrovskiy B., Feduykin I., Latysheva I., Rimskiy A., 2021. Duration of the Carbon Isotope Excursion in the Zhuya Group (Patom Basin, South Siberia). In: *Proceedings of the EGU General Assembly Conference Abstracts* (April 19–30, 2021). EGU21-15845. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15845>.

Shatsillo A.V., Rudko D.V., Latysheva I.V., Feduykin I.V., 2020. The First Paleomagnetic Data on the Neoproterozoic of the Eastern Slope of the Longdor Rise (Siberian Platform). In: *Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent)*. *Proceedings of Scientific Meeting* (October 20–23, 2020). Iss. 18. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 391–394 (in Russian) [Шацилло А.В., Рудько Д.В., Латышева И.В., Федюкин И.В. Первые палеомагнитные

данные по неопротерозою восточного склона Лонгдорского поднятия (Сибирская платформа) // *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научного совещания* (20–23 октября 2020 г.). Иркутск: ИЭК СО РАН, 2020. Вып. 18. С. 391–394].

Shcherbakov V.P., Gribov S.K., Aphinogenova N.A., Tsel'movich V.A., 2020. Single Phase Oxidation of Ferrimagnetic Grains as a Cause of L-Shaped Arai–Nagata Diagrams. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth* 56, 665–674. <https://doi.org/10.1134/S1069351320050109>.

Shcherbakov V.P., Gribov S.K., Lhuillier F., Aphinogenova N.A., Tsel'movich V.A., 2019. On the Reliability of Absolute Palaeointensity Determinations on Basaltic Rocks Bearing a Thermochemical Remanence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 124 (8), 7616–7632. <http://dx.doi.org/10.1029/2019JB017873>.

Smirnov V.B., Ponomarev A.V., 2020. *Physics of Transitional Regimes of Seismicity*. RAS, Moscow, 412 p. (in Russian) [Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН, 2020. 412 с.].

Smirnov M., Sychev A., Veselovskiy R., Minaev P., Powerman V., Salnaia N., 2019. "ORION" – the Versatile Full-Vector Sample Magnetometer for Paleointensity, Rock Magnetic and Paleomagnetic Studies. In: *Proceedings of the European Geosciences Union General Assembly* (April 7–12, 2019, Vienna, Austria). Vol. 21. EGU2019–5608.

Smul'skaya A.I., Matveev M.A., Morozov Yu.A., 2021. Features of Rock Melting and Melt Crystallization during the Seismic Process. In: *Physical-Chemical and Petrophysical Researches in the Earth's Sciences. Proceedings of the XXII International Conference* (September 27–29, Moscow – October 1, 2021, Borok). IGEM RAS, Moscow, p. 252–255 (in Russian) [Смульская А.И., Матвеев М.А., Морозов Ю.А. Особенности плавления пород и кристаллизации расплава в ходе сейсмического процесса // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле: Материалы XXII международной конференции (27–29 сентября, Москва – 1 октября 2021 г., Борок). М.: ИГЕМ РАН, 2021. С. 252–255].

Sobolev G.A., Ponomarev A.V., 2003. *Physics of Earthquakes and Precursors*. Nauka, Moscow, 270 p. (in Russian) [Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.].

Tikhotsky S.A., Fokin I.V., Bayuk I.O., Beloborodov D.E., Berezina I.A., Dubinya N.V., Gafurova D.R., Krasnova M.A. et al., 2017. Complex of Laboratory Core Analysis at CPGR IPE RAS. *Science and Technological Developments* 96 (2), 17–32 (in Russian) [Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Баяк И.О., Белобородов Д.Е., Березина И.А., Гафурова Д.Р., Дубиня Н.В., Краснова М.А. и др. Комплексные лабораторные исследования керн в ЦПГИ ИФЗ РАН // Наука и технологические разработки. 2017. Т. 96. № 2. С. 17–32]. <https://doi.org/10.21455/std2017.2-2>.

Troyano M., Gallet Y., Genevey A., Pavlov V., Fournier A., Lagroix F., Niyazova M., Mirzaakhmedov D., 2021. Analyzing the Geomagnetic Axial Dipole Field Moment over the Historical Period from New Archeointensity Results at Bukhara



(Uzbekistan, Central Asia). *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 310, 106633. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106633>.

Veselovskiy R., Samsonov A., Stepanova A., Salnikova E., Larionova Y., Travin A., Arzamastsev A., Egorova S. et al.,

2019. 1.86 Ga Key Paleomagnetic Pole from the Murmansk Craton Intrusions – Eastern Murman Sill Province, NE Fennoscandia: Multidisciplinary Approach and Paleotectonic Applications. *Precambrian Research* 324, 126–145. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.01.017>.