

**Министерство науки и высшего образования РФ**  
**Федеральное государственное бюджетное учреждение**  
**науки ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР**  
**имени академика М. А. Садовского**  
**Российской академии наук**

**ОТЧЕТ О НАУЧНОЙ**  
**И НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННОЙ**  
**ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИДГ РАН В 2022 г.**

**Москва-2023**

**Отчет о научной и научно-организационной деятельности ИДГ РАН за 2022 г.**

М.: ИДГ РАН. 2023. – 50 с. : ил.

Сборник содержит информацию об основных научных результатах, полученных сотрудниками ИДГ РАН в 2022 году. Приводится библиографический список опубликованных статей в периодических изданиях, включенных в базу реферативной информации: Web of Science, Scopus, систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), Google Scholar и др. в 2022 г.

Ответственный редактор:  
д.ф.-м.н., профессор *Г.Г. Кочарян*  
Компьютерная подготовка  
оригинал-макета: *В.В. Ежакова*

# ВВЕДЕНИЕ

В 2022 году Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук провел исследования, предусмотренные планами Государственного задания Минобрнауки РФ, грантами Российского научного фонда и РФФИ, договорами с различными организациями. Важным научным достижением ИДГ РАН в 2022 году стала одновременная регистрация на уникальной научной установке СКГН «Михнево» (УНУ СКГН «Михнево») комплекса геофизических эффектов, вызванных извержением вулкана Тонга 15.01.2022 года на расстоянии около 15000 км. Было обнаружено воздействие извержения вулкана на амплитуду Шумановского резонанса, сейсмические и микробарические возмущения, вариации геомагнитного поля, возмущения концентрации микрочастиц и электрического поля в приземном слое атмосферы и гидрогеологический отклик водоносных горизонтов. Полученные результаты доказывают существование механизмов взаимодействия геофизических возмущений в системе литосфера-атмосфера-ионосфера и используются в разработке теоретических моделей верхних геосфер. В работе приняли участие сотрудники четырех лабораторий ИДГ РАН.

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ в 2022 году:

- Геомеханика блочных структур и разломов земной коры, очагов динамических событий; триггерные эффекты в геосистемах; техногенная сейсмичность; подземная флюидодинамика; безопасное и эффективное освоение земных недр, в том числе в Арктическом регионе; динамическая устойчивость подземных сооружений; сейсмология, изучение структур Земли сейсмическими методами; пространственные модели строения литосферы, сейсмический мониторинг природных и промышленных объектов; сейсмология взрывов.
- Приповерхностная геофизика, взаимодействие геосфер, преобразование и взаимодействие физических полей в приповерхностной зоне Земли, их связь с процессами во внутренних и внешних геосферах; разработка методов комплексного геофизического мониторинга локальных участков земной коры в районах расположения особо ответственных объектов.
- Динамические, радиационные и плазмохимические процессы в ионосфере и атмосфере Земли; физические поля и токи в геосферах; распространение электромагнитных волн в возмущенной среде; ионосферно-магнитосферные связи и взаимодействия.
- Процессы при экстремальных воздействиях на геосферы (взрывах, извержениях вулканов, внедрении внеземных тел и их ударов по поверхности Земли) и их последствия; разработка компьютерных моделей крупномасштабных природных катастроф.
- Комплексное приборное, методическое и геофизическое обеспечение решения вопросов рационального освоения недр и национальной безопасности; разработка и создание геофизических датчиков и приборов; развитие междисциплинарных центров мониторинга динамики физических полей Земли.
- Разработка и изготовление адаптивных оптических систем для управления параметрами мощного лазерного излучения, а также компенсации искажений светового излучения в условиях атмосферной турбулентности.

Исследования, проводимые в ИДГ РАН, сочетают экспедиционные геофизические исследования, уникальные лабораторные геофизические эксперименты, численное моделирование комплексных

геофизических процессов. Особое внимание уделяется разработке новых средств регистрации и переходу на перспективные методы обработки геофизических данных, основанные на технологиях машинного обучения и больших данных.

В 2022 году получены фундаментальные результаты по параметрам рельефа внутреннего ядра Земли. Впервые оценено глубинное скоростное строение земной коры и верхней мантии западной оконечности Восточно-Европейской платформы; начаты работы по изучению глубинного скоростного строения земной коры и верхней мантии Дальневосточной активной континентальной окраины. В 2022 году в ИДГ РАН создана методика лабораторного исследования нелинейности фильтрационных свойств низкопроницаемой горной породы. Выполнен анализ и проведена систематизация данных о строении крупных разломов. Получены новые результаты численных расчетов последствий падений космических тел в океан и результатов падения осколков раздробленных космических тел. Разработан метод обработки данных измерений электромагнитных волн КНЧ диапазона, позволивший получать высокочастотные данные по вариациям параметров Шумановских резонансов в волноводе Земля-ионосфера.

Для изучения роста трещины гидроразрыва в условиях лабораторных опытов, моделирования коллимационной инжекции плазменных струй в ионосфере Земли и для расчета изменения проницаемости массива горных пород в ближней зоне взрывов со сложной конфигурацией расположения зарядов ВВ разработаны новые численные модели. В ИДГ РАН сформировалось перспективное направление исследований по поиску прогностических признаков сильных атмосферных явлений с опасными последствиями, определяемых по вариациям геофизических полей и регистрируемых за 5–8 часов до наступления опасного явления.

Признанием авторитета ИДГ РАН является участие наших ученых в 10 грантах Российского научного фонда и 3 грантах РФФИ. ИДГ РАН уделяет большое внимание коммерциализации и внедрению результатов научных исследований. В 2022 году выполнены 8 договоров с коммерческими организациями и 2 договора с Госкорпорацией «Росатом» в рамках Государственного заказа. Результаты выполнения Государственного задания учеными Института в 2022 г. опубликованы в более 100 публикациях.

В 2022 году сборник научных трудов ИДГ РАН «Динамические процессы в геосферах» был преобразован в электронный научный журнал «Динамические процессы в геосферах» (<http://dyngeo.ru>). Главным редактором сетевого издания стал ведущий ученый ИДГ РАН доктор физ.-мат. наук *Б. А. Иванов*. Журнал выходит четыре раза в год. Первые выпуски журнала содержат материалы, представленные на 6-й Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах», которая состоялась 21–24 июня 2022 г. в г. Москве.

В ИДГ РАН большое внимание уделяется работе с научной молодежью. Ведущие специалисты Института преподают на базовой кафедре **Теоретическая и экспериментальная физика геосистем** Московского физико-технического института, в аспирантуре ИДГ РАН. В 2022/2023 учебном году на кафедре обучается 13 студентов и 6 аспирантов.

Ниже приведены краткие сведения о научной и научно-организационной деятельности ИДГ РАН в 2022 году.

А. Н. Ляхов, к.т.н.  
заместитель директора по научной работе

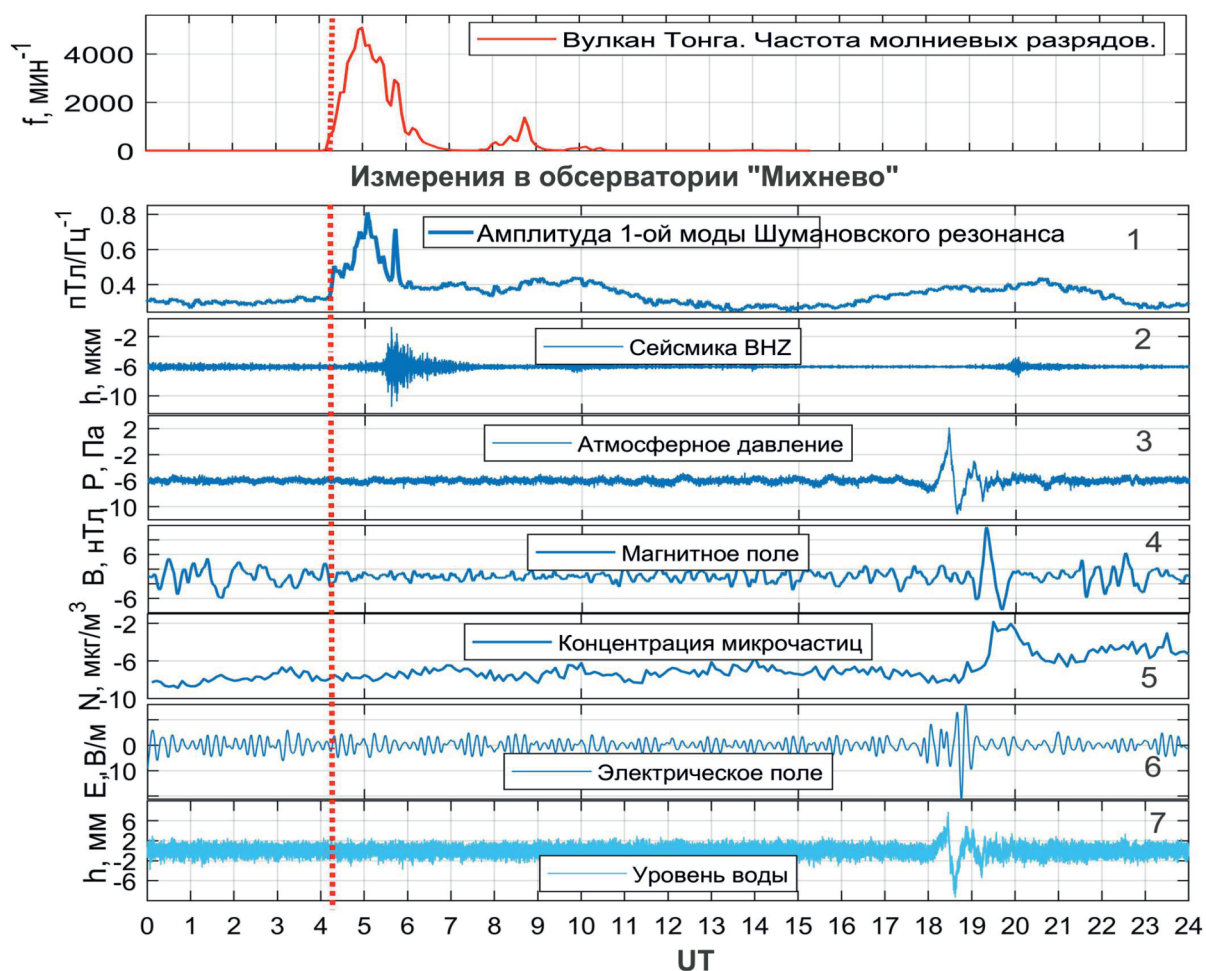


# Важнейшие результаты научных исследований ИДГ РАН за 2022 год

## ВЛИЯНИЕ СИЛЬНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ НА ГЕОФИЗИЧЕСКУЮ СРЕДУ

**Авторы:** академик РАН В. В. Адушкин, аспирант Н. С. Ачкасов, к.ф.-м.н. А. Н. Беседина, д.ф.-м.н. Б. Г. Гаврилов, д.г.-м.н. Э. М. Горбунова, с.н.с. В. М. Ермак, м.н.с. Е. Н. Козакова, м.н.с. А. В. Крашенинников, д.ф.-м.н. В. М. Овчинников, м.н.с. С. М. Петухова, кандидаты физ.-мат. наук Ю. В. Поклад, Ю. С. Рыбнов, С. А. Рябова, И. А. Ряховский, доктора физ.-мат. наук С. П. Соловьев, А. А. Спивак, к.ф.-м.н. О. А. Усольцева

**В**первые в одном измерительном пункте с использованием уникальной научной установки Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево» (УНУ СКГН «Михнево») удалось зарегистрировать геофизические эффекты, вызванные извержением вулкана Тонга 15.01.2022 г. на



Анализ синхронных измерений разнообразных геофизических параметров позволил исследовать воздействие молниевой активности вулкана на амплитуду Шумановского резонанса (1), сейсмические и микробарические возмущения (2, 3), вариации геомагнитного поля (4), возмущения концентрации микрочастиц (5) и электрического поля в приземном слое атмосферы (6), гидрогеологический отклик водоносных горизонтов (7)

расстоянии около 15000 км. Получение такой комплексной информации позволяет не только проследить динамику изменения физических полей, но и провести исследования механизмов взаимодействия геофизических возмущений в системе литосфера-атмосфера-ионосфера, влияния параметров среды на условия и скорость распространения различных агентов возмущения среды. Полученные данные используются для корректировки и развития физических и прогностических моделей атмосферы и ионосферы Земли.

#### Публикации:

1. *Adushkin V.V., Rybnov Yu.S., Spivak A.A.* Wave-related, electrical, and magnetic effects due to the January 15, 2022 catastrophic eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'aapai volcano // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2022. Vol. 16. P. 251-263. <https://doi.org/10.1134/S0742046322040029>
2. *Gavrilov, B.G., Poklad, Y.V., Ryakhovsky, I.A., Ermak, V.M., Achkasov, N.S., & Kozakova, E.N.* (2022). Global electromagnetic disturbances caused by the eruption of the Tonga volcano on 15 January 2022 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2022JD037411. <https://doi.org/10.1029/2022JD037411>
3. *Горбунова Э.М., Ряховский И.А., Гаврилов Б.Г., Поклад Ю.В., Петухова С.М., Беседина А.Н.* Вариации геофизических полей при извержении вулкана Тонга по данным уникальной научной установки «Михнево» // *Геофизические процессы и биосфера*. 2022. Т. 21, № 4.С. 5–22. <https://doi.org/10.21455/GPB2022.4-1>
4. *Poklad, Y.V., Ryakhovsky, I.A., Gavrilov, B.G., Ermak, V.M., Kozakova, E.N., & Achkasov, N.S.* (2022). Investigation of the reaction of Schumann resonances to short transient geophysical events under the influence of atmospheric electromagnetic noise // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2022JD036820. <https://doi.org/10.1029/2022JD036820>

Работа выполнена в рамках гос. заданий Минобрнауки России: [№ 122032900172-5](#) «Развитие методов контроля геодинамических процессов разного иерархического уровня, в том числе инициированных техногенной деятельностью», [№ 122032900175-6](#) «Определение состояния и динамики среднеширотной нижней ионосферы по данным измерений и анализа параметров радиосигналов КНЧ/ОНЧ диапазона», [№122040400015-5](#) «Структурные особенности и динамика недр Земли – коры, верхней мантии и внутреннего ядра по сейсмическим данным», [№ 122032900185-5](#) «Проявление явлений и процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях».

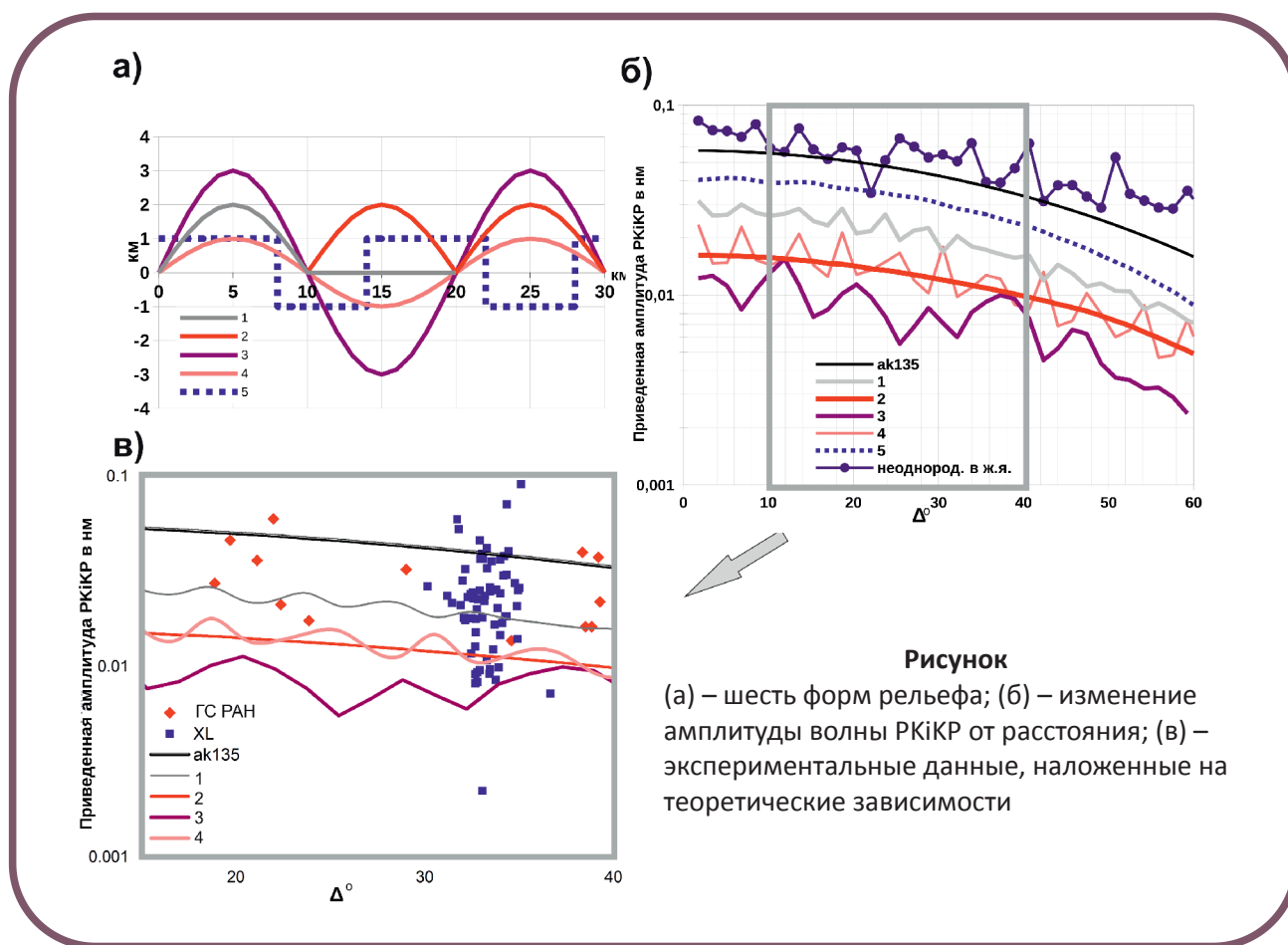
Руководители НИР: кандидаты физ.-мат. наук *А. Н. Беседина*, *И. А. Ряховский*, доктора физ.-мат. наук *И. А. Санина*, *С. П. Соловьев*

## РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ ВНУТРЕННЕГО ЯДРА

Авторы: к. ф.-м. н. О. А. Усольцева, д. ф.-м. н. В. М. Овчинников

На основе совместного анализа (см. Рисунок) модельных (а, б) и измеренных (в) на 100 сейсмических станциях характеристик докритически отраженных от границы между внешним и внутренним ядром волн РКіКР получены пространственные оценки мелкомасштабных неоднородностей поверхности внутреннего ядра в виде рельефа высотой 1–2 км и латеральным размером 7.5–25 км. Впервые теоретические зависимости амплитуды волн РКіКР от расстояния рассчитаны для частоты колебаний более 2 Гц и поверхности внутреннего ядра Земли с различной формой рельефа.

Рост внутреннего ядра, сопровождающийся высвобождением скрытого тепла, лёгких элементов и формирующего рельеф поверхности внутреннего ядра, поддерживает один из самых важных геофизических процессов Земли – конвекцию в жидком ядре, которой отводят главную роль в генерации и поддержании магнитного поля Земли.



Рисунок

(а) – шесть форм рельефа; (б) – изменение амплитуды волны РКіКР от расстояния; (в) – экспериментальные данные, наложенные на теоретические зависимости

### Публикации:

1. *Usoltseva O.A., Ovtchinnikov V.M.* Inhomogeneity of the Earth's inner core boundary from the characteristics of pre-critical reflected waves: numerical models and observations // *Problems of Geocosmos–2022. Proceedings of the XIV International Conference and School. Series: Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences.* 2023.

Работа выполнена в рамках гос. задания Минобрнауки России: № 122040400015-5 «Структурные особенности и динамика недр Земли – коры, верхней мантии и внутреннего ядра по сейсмическим данным».

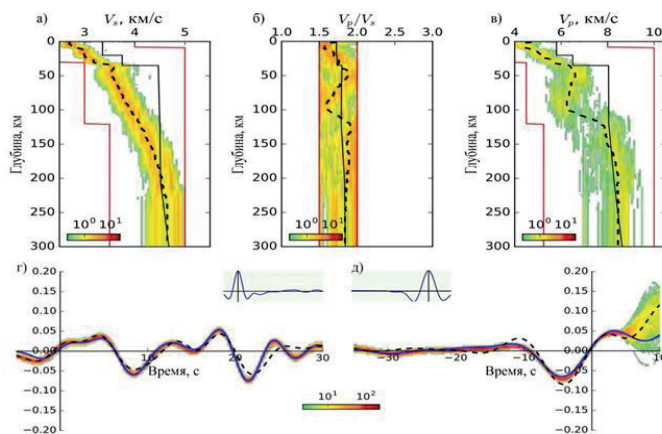
# Результаты, полученные Институтом в 2022 году, по темам Государственного задания

## № 122040400015-5 Структурные особенности и динамика недр Земли – коры, верхней мантии и внутреннего ядра по сейсмическим данным (рук. НИР д. ф.-м. н., г.н.с. И. А. Санина)

1. *Исследования строения земной коры и верхней мантии регионов с различным геодинамическим режимом.* В рамках работ по исследованию глубинного строения центральной части Восточно-Европейской платформы (ВЕП) были открыты две новые широкополосные сейсмические станции «Владимир» (VLD) и «Борок» (BRK). Таким образом, к настоящему моменту площадная региональная сеть одиночных сейсмических станций ИДГ РАН насчитывает пять постоянных точек регистрации.

Центральная часть ВЕП представляет собой место древней коллизии трех протократонов – Фенноскандии, Волго-Уралии и Сарматии. На основе данных новой сейсмической станции «Александровка» впервые оценено глубинное скоростное строение земной коры и верхней мантии западной оконечности коллизионной зоны центральной части ВЕП в зоне сочленения с микроконтинентом Сарматия до 300 км методом функций приемника. По данным моделирования были выявлены характерные особенности разреза: в средней коре выявлен слой повышенных скоростей  $V_s$  на глубине 13–27 км; коро-мантийный переход характеризуется резким скачком скоростей на глубине около 42 км; в верхней мантии выявлен слой относительно пониженных скоростей сейсмических волн на глубине 130–180 км, вероятно, маркирующий средне-литосферную неоднородность (MLD). Анализ глубины залегания границы кора-мантия в коллизионной зоне выявляет ее погружение в восточном направлении вдоль субмеридионального профиля Александровка–Обнинск–Михнево от значений 42 до величины около 56 км.

Начаты работы по изучению глубинного скоростного строения земной коры и верхней мантии Дальневосточной активной континентальной окраины на примере полуострова Камчатка. Впервые, на основе совместного анализа продольных (PRF) и поперечных (SRF) функций приемника, получена модель района Авачинской бухты по данным трех широкополосных сейсмических станций до глубины порядка 300 км. Значения скоростей в земной коре и верхней мантии оказались заметно ниже по сравнению с глобальной стандартной моделью IASP91. Среднее отклонение наблюдаемых скоростей от стандартных составляет 0.5–1.0 км/с в коре и подкоревой части мантии, а затем постепенно уменьшается вплоть до глубины порядка 180 км. На больших глубинах скорости в полученных моделях совпадают со стандартными значениями. Следует отметить, что в районе исследования нижняя граница погружающейся Тихоокеанской плиты проходит на глубинах около 180 км. Поэтому, вероятно, основная причина расхождения скоростей связана с существенным нагревом вещества и сложной флюидодинамической обстановкой в области мантийного клина.



Скоростная модель поперечных волн (а), продольных волн (в) и их отношения (б). Наблюдаемые суммарные PRF показаны синим (г), SRF – (д). Пунктирными линиями показаны окончательные медианные модели. Красные линии обозначают границы формирования случайных начальных моделей. Черные линии представляют модель IASP91

**Авторы:** к. ф.-м.н. А. Г. Гоев, инженер  
Р. А. Резниченко, м.н.с. С. А. Тарасов

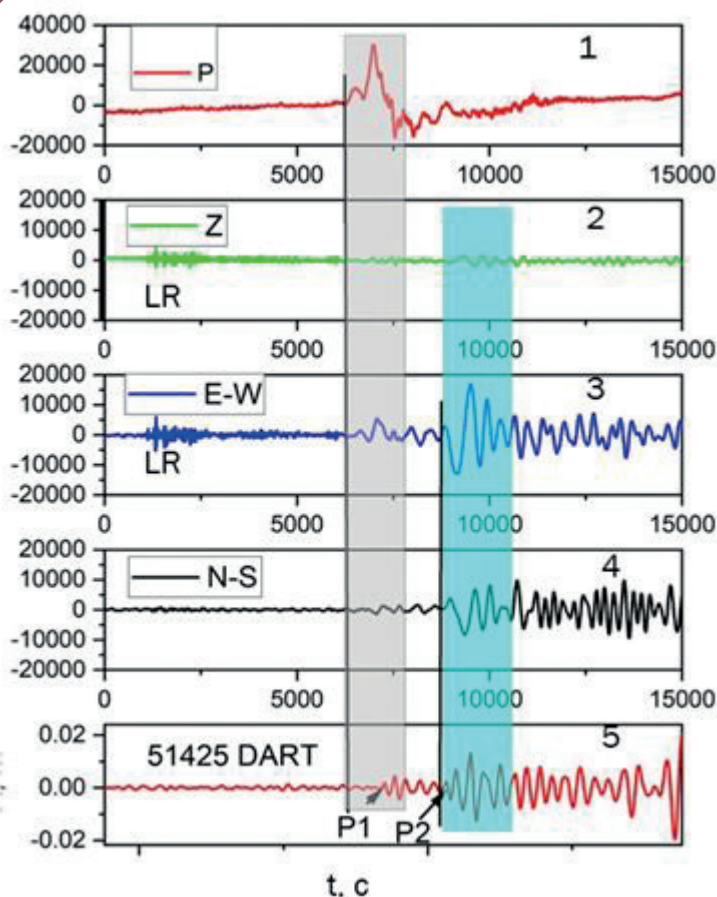


2. Изучение динамических характеристик среды центральной части ВЕП. Одним из важнейших параметров, характеризующих динамические параметры среды, является сейсмическая добротность (Q). Для ее оценки в центральной части ВЕП был проведен эксперимент по установке профиля из пяти сейсмических станций на трассе МСГ «Михнево» – карьер «Михайловский». По данным регистрации двух промышленных взрывов: массового и подрыва одной ступени – с использованием метода расчета амплитудного коэффициента затухания и метода отношения спектральных амплитуд – параметр Q оценен равным для Р- волн около 400 и S- волн около 900.

3. Сейсмические явления, связанные с извержением вулкана в районе архипелага Тонга 15 января 2022 г.

В структуре сейсмического волнового поля, возбужденного извержением вулкана на архипелаге Тонга 15 января 2022 г. выделены три типа возмущений, зарегистрированные сейсмическими каналами в частотном диапазоне 0.0003–0.1 Гц (фреймы 2, 3, 4 на рисунке): поверхностные волны Рэля (LR) со средним периодом колебаний 23 с и групповой скоростью 3.6–3.8 км/с и два других типа P1 и P2 (выделены на рисунке тонированными прямоугольниками). Волна P1 с характерным периодом 268 с и кажущейся скоростью распространения возмущения 0.28–0.37 км/с синхронизована по времени и частотному составу с инфразвуковым возмущением в атмосфере. Этот тип возмущений обусловлен гравитационным откликом сейсмометра на акустическое возмущение в атмосфере. Для второго типа сейсмических возмущений P2 скорость распространения составляет 0.21–0.28 км/с с характерными периодами 450 с на горизонтальных компонентах сейсмоприемников. Этот тип сейсмических возмущений обусловлен взаимодействием гравитационной волны (фрейм 5 на рисунке) в гидросфере с побережьем островов, на которых расположены сейсмические станции.

Детальное изучение взаимосвязи характеристик волн Рэля с возмущениями в атмосфере и гидросфере позволяет на этой основе осуществлять прогноз опасности волн цунами, связанных с гравитационными волнами в гидросфере.



**Рисунок**

Пример регистрации возмущений на сейсмической станции Раратонга (RAR) на расстоянии 14 градусов: 1 – инфразвук (волна Лэмба), 2 – вертикальная компонента сейсмограммы; 3 – горизонтальная компонента восток–запад (E-W); 4 – горизонтальная компонента север–юг (N-S); 5 – запись донного датчика давления системы наблюдений DART

**Авторы:** к. ф.-м. н. О. А. Усольцева,  
д. ф.-м. н. В. М. Овчинников

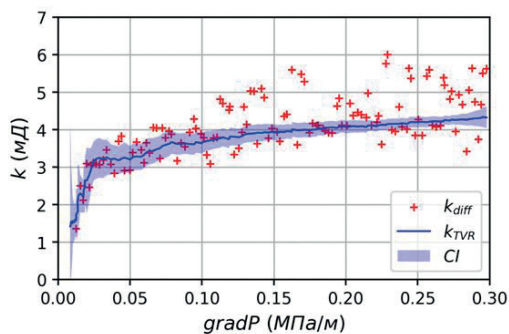
#### Публикации:

1. Гоев А.Г. Первые результаты моделирования глубинного скоростного строения восточной окраины протократона Сарматия по данным сейсмической станции «Александровка» методом продольных функций приемника // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 6. С. 88–94. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2022-6-88-94>
2. Овчинников В.М., Усольцева О.А. Сейсмические явления, связанные с извержением вулкана в районе архипелага Тонга 15 января 2022 г. // Физика Земли. В печати.
3. Goev A.G., Sanina I.A., Konstantinovskaya N.L., Ovchinnikova O.V. Opportunities for studying weak seismicity in the central part of the East European craton using the «Aleksandrovka» broadband seismic station // Moscow University Geology Bulletin. 2022. Vol. 77. No. 1. pp. 147–155. <https://doi.org/10.3103/S0145875222010069>
4. Санина И.А., Константиновская Н.Л., Овчинникова О.В., Усольцева О.А. Оценка параметра добротности по данным наблюдений вдоль профиля «Карьер «Михайловский» – МСГ «Михнево»» // Геофизические процессы и биосфера. В печати.

#### № 122032900167-1 Разработка прогнозных моделей реакции флюидных систем земной коры на техногенное воздействие (рук. НИР к.ф.-м.н., в.н.с. Н. А. Барышников)

1. Методика лабораторного исследования нелинейности фильтрационных свойств низкопроницаемой горной породы. Разработана методика лабораторных испытаний нелинейных фильтрационных свойств низкопроницаемой горной породы, основанная на проведении измерений при медленном спаде градиента порового давления. Особенность данной методики состоит в том, что расход жидкости измеряется путём её непрерывного взвешивания. Такой способ позволяет исследовать очень медленные потоки, но при этом требует применения особого подхода к вычислению расхода по данным об изменении массы. В качестве такого подхода была предложена методика, основанная на методе регуляризации квадратичного отклонения. Это дало возможность исследовать связь между эффективной проницаемостью и градиентом порового давления в образцах горной породы при скоростях потока порядка 1 сантиметра в сутки, характерных для фильтрационных процессов в естественных подземных флюидных системах. Полученная методика может быть использована для более точной оценки проницаемости плотных горных пород, фильтрационные свойства которых могут быть существенно нелинейны.

**Авторы:** к. ф.-м. н. Н. А. Барышников, с.н.с. Е. В. Зенченко, д. ф.-м. н. С. Б. Турунтаев



Зависимость эффективной проницаемости образца известняка от градиента порового давления.  $k_{TVR}$  – проницаемость, полученная с помощью предложенного метода TVR;  $k_{diff}$  – проницаемость, вычисленная по методу конечных разностей. CI – оценка 95% доверительного интервала. Снижение в области низкого градиента свидетельствует о нелинейности фильтрационных свойств

#### Публикации:

1. Baryshnikov, N.A., Zenchenko, E.V., & Turuntayev, S.B. Dependence of effective permeability on pore pressure gradient at low flow rates in low-permeability limestone // Interpretation, 11(1), T1–T6. <https://doi.org/10.1190/INT-2021-0110.1>
2. Барышников Н.А., Зенченко Е.В., Турунтаев С.Б. Применение метода регуляризации квадратичного отклонения для анализа результатов лабораторных исследований нелинейных фильтрационных потоков // Динамические процессы в геосферах. 2022;14(1):85-92. [https://doi.org/10.26006/22228535\\_2022\\_14\\_1\\_85](https://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_85)

2. Валидация метода *log-log* оценки полудлины трещины гидроразрыва и проницаемости среды. В рамках задачи развития методов интерпретации кривых давления закачиваемой жидкости при гидроразрыве исследована возможность оценки полудлины трещины и проницаемости среды при анализе экспериментальных кривых спада давления методом *log-log*. Данный метод считается одним из наиболее надежных и точных методов обработки зависимостей давления от времени, который позволяет анализировать процессы в разрабатываемой среде при прекращении закачки до закрытия трещины ГРП и после. Метод рассматривает образование и распространение линейной трещины гидроразрыва в бесконечном пороупругом проницаемом пласте. Суть метода заключается в правильной идентификации режимов течения, которые реализуются на разных промежутках времени в ближней зоне пласта в процессе закрытия трещины. Для этого используется отображение характеристической и импульсной производной кривой спада давления на графике в двойном логарифмическом масштабе. Анализ проведен для кривых спада давления, полученных нами ранее в ходе лабораторного моделирования гидроразрыва пласта. Было установлено, что в большинстве экспериментов реализовались только линейный режим течения до закрытия трещины и псевдо-линейный режим течения после ее закрытия. В результате проведенного анализа были оценены полудлины образованных трещин гидроразрывов и проницаемости модельных образцов, показано хорошее совпадение с экспериментальными величинами.

Авторы: м.н.с. Е. В. Новикова, м.н.с. М. А. Тримонова

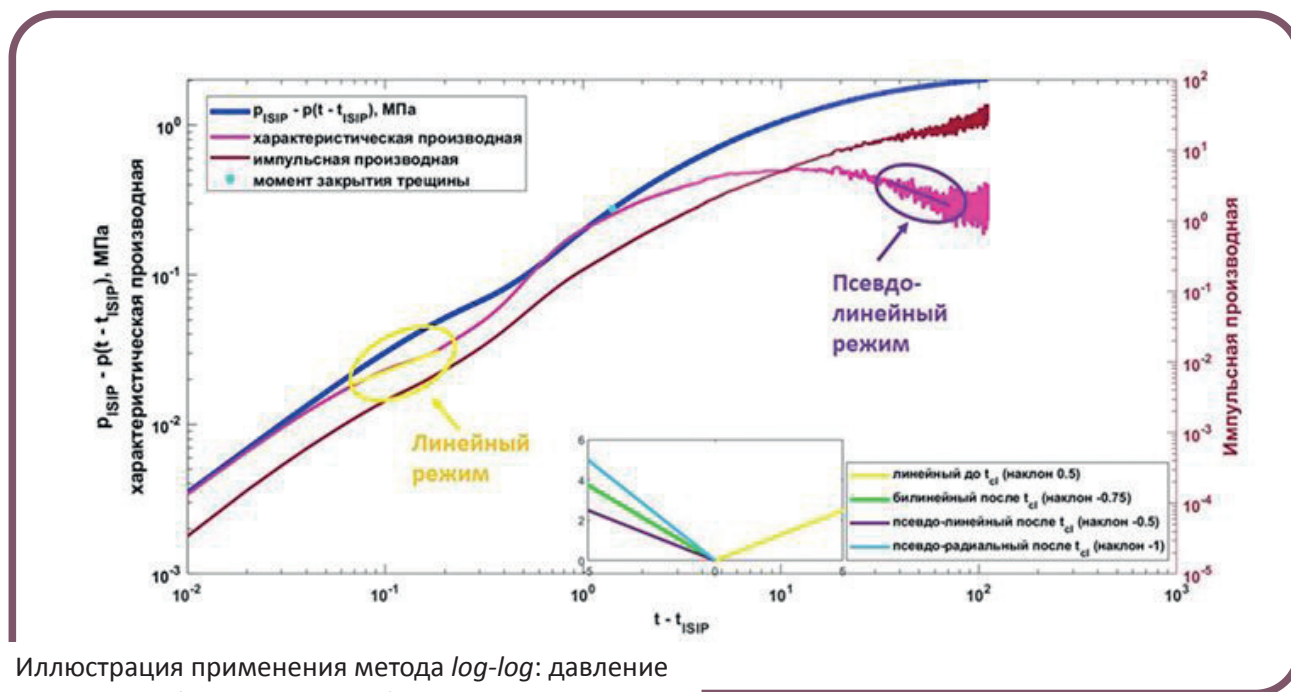
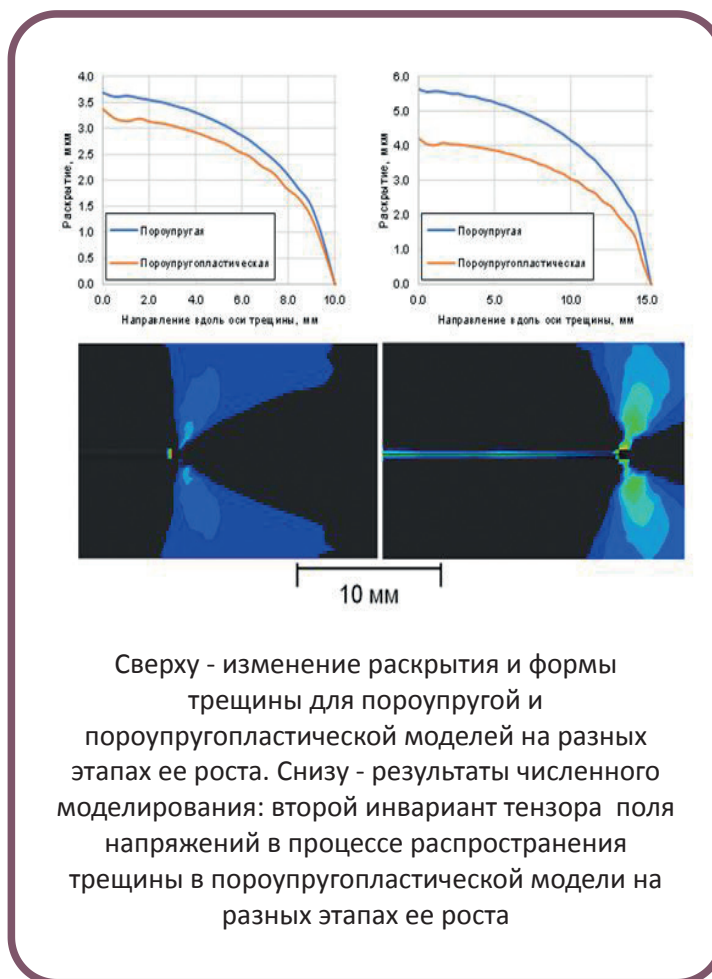


Иллюстрация применения метода *log-log*: давление от времени (синяя кривая  $\Delta p$ ), характеристическая производная давления от времени (розовая кривая  $\Delta t \cdot \partial \Delta p / \partial \Delta t$ ), импульсная производная давления от времени (бордовая кривая  $(\Delta t^2) \cdot \partial \Delta p / \partial \Delta t$ ). На кривой характеристической производной давления от времени отмечены участки, которые соответствуют разным режимам течения жидкости в модельном образце с трещиной до ее закрытия и после. Момент закрытия трещины соответствует точке перегиба характеристической производной давления (бирюзовая точка)

#### Публикации:

1. Новикова Е.В., Тримонова М.А. Анализ методом *log-log* лабораторных кривых зависимости давления от времени гидроразрыва пласта // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах : Материалы 8 Международной научн. конф.-школы молодых ученых, Москва, 12–14 октября 2022 года. Москва. ООО «Принт Про», 2022. С. 124–127.

3. Влияние пластических свойств среды на рост трещины ГРП. В рамках задачи о подборе и подготовке программных исследовательских кодов и алгоритмов для численного моделирования механического поведения пористой среды на микроуровне при изменении порового давления исследованы параметры пластичности модельной пористой среды, используемой при проведении лабораторного моделирования гидроразрыва пласта. Была проведена серия лабораторных опытов по псевдотрёхосному сжатию. Экспериментальные диаграммы деформирования были сопоставлены с кривыми, полученными в результате численного моделирования для модели пластичности с неассоциированным законом течения с учётом упрочнения среды. Результаты были сформулированы в виде уточненного набора коэффициентов в модели Друкера – Прагера – Николаевского и использованы для численного моделирования роста трещины гидроразрыва в условиях лабораторных опытов. В результате были получены распределения эквивалентных пластических деформаций, поля изменения порового давления и напряжений, раскрытие, форма и скорости роста трещин ГРП для пороупругой и пороупругопластической моделей среды.



Результаты моделирования показывают важность учёта пластических свойств среды при проведении ГРП. В частности, пластичность оказывает существенное влияние на скорость роста трещины.

**Авторы:** м.н.с. В. А. Начев, м.н.с. М. А. Тримонова, студентка Е. М. Гребенщикова

#### Публикации:

1. Начев В.А., Гребенщикова Е.М. Численное моделирование поведения пороупругопластического искусственного материала в процессе проведения ГРП // Динамические процессы в геосферах. 2022;14(2):62–74.

[https://doi.org/10.26006/29490995\\_2022\\_14\\_2\\_62](https://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_62)

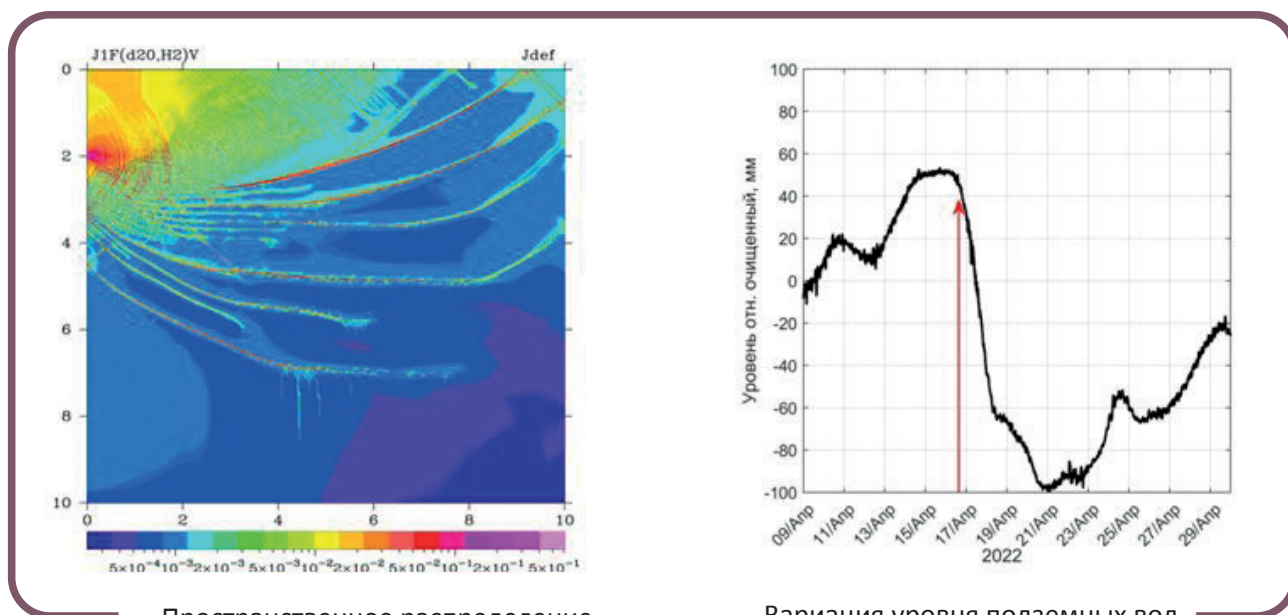
2. Начев В.А. Физико-математическое моделирование образования сети трехмерных трещин в породах-коллекторах в масштабах порового пространства // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Материалы 8-й Международной научной конференции-школы молодых ученых, Москва, 12–14 октября 2022 года. Москва. ООО «Принт Про», 2022. С. 153–156.



№ 122032900172-5 Развитие методов контроля геодинамических процессов разного иерархического уровня, в том числе инициированных техногенной деятельностью  
(рук. НИР к. ф.-м. н., с.н.с. А. Н. Беседина)

1. Изменение проницаемости массива при проведении взрывных работ зарядами сложной конфигурации. Разработана уникальная численная методика расчета изменения проницаемости массива горных пород в ближней зоне взрывов со сложной конфигурацией расположения зарядов ВВ. Методика верифицирована на уникальных результатах натурных измерений при проведении крупных подземных взрывов и может быть использована для оценки изменения свойств массива в случае применения инновационных методов разработки месторождений сланцевой нефти, интенсификации притока на истощенных месторождениях углеводородов, при эксплуатации геотермальных ресурсов и т.д. Впервые инструментально выявлено поствзрывное снижение уровня водоносного горизонта в дальней зоне массового взрыва при разработке месторождений полезных ископаемых Курской магнитной аномалии. Учет обнаруженного эффекта при проектировании взрывных работ в шахтах и на карьерах позволит снизить негативное техногенное влияние на водоносные горизонты

**Авторы:** д.т.н. А. М. Будков, д.ф.-м.н. Г. Г. Кочарян, к.ф.-м.н. С. Б. Кишкина, д.г.-м.н. Э. М. Горбунова, кандидаты физ.-мат. наук. А. Н. Беседина, Н. В. Кабыченко, м.н.с. С. М. Петухова



Пространственное распределение максимальных значений коэффициента относительного изменения проницаемости среды при взрыве ВВ в вертикальной трещине (0, 2) по оси ординат

Вариация уровня подземных вод, очищенного от влияния помех; красной стрелкой обозначен момент взрыва

**Публикации:**

1. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Батухтин И.В., Петухова С.М. Постсейсмические эффекты массовых взрывов, выделенные при разработке железорудных месторождений КМА // Динамические процессы в геосферах, 2022, Т.14, № 1. С. 51–68.  
[https://doi.org/10.26006/22228535\\_2022\\_14\\_1\\_51](https://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_51)

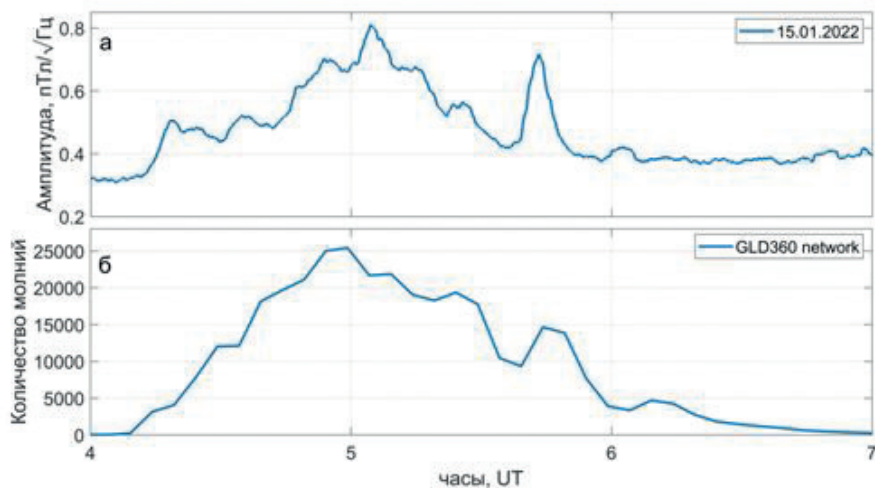
2. Будков А.М., Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б. Оценка изменения проницаемости массива прочных горных пород в окрестности подземного взрыва по результатам численного моделирования. Принята к публикации в журнал ФТПРПИ.

№ 122032900175-6 **Определение состояния и динамики среднеширотной нижней ионосферы по данным измерений и анализа параметров радиосигналов КНЧ/ОНЧ диапазона**  
(рук. НИР к.ф.-м.н., в.н.с. *И. А. Ряховский*)

1. *Методика расчета параметров шумановского резонанса (ШР) с высоким временным разрешением.* Разработанная методика позволяет детально исследовать влияние быстропротекающих гелиогеофизических возмущений на состояние и динамику нижней ионосферы Земли. Вариации амплитудных и фазовых характеристик радиосигналов КНЧ/ОНЧ диапазона позволяют получать данные об изменении параметров ШР и профиля электронной концентрации в нижней ионосфере.

Анализ результатов этих измерений позволил получить эмпирические зависимости реакции ШР на рентгеновское излучение солнечных вспышек разных энергетических классов. В процессе исследования глобальных геофизических эффектов, вызванных катастрофическим извержением вулкана Тонга 15.01.2022, удалось обнаружить не только факт возмущения ШР, но и впервые установить связь вариаций амплитуды ШР с молниевой активностью в районе извержения.

**Авторы:** кандидаты физ.-мат. наук *Ю. В. Поклад, И. А. Ряховский*, д.ф.-м.н. *Б. Г. Гаврилов*, с.н.с. *В. М. Ермак*, м.н.с. *Е. Н. Казакова*, аспирант *Н. С. Ачкасов*



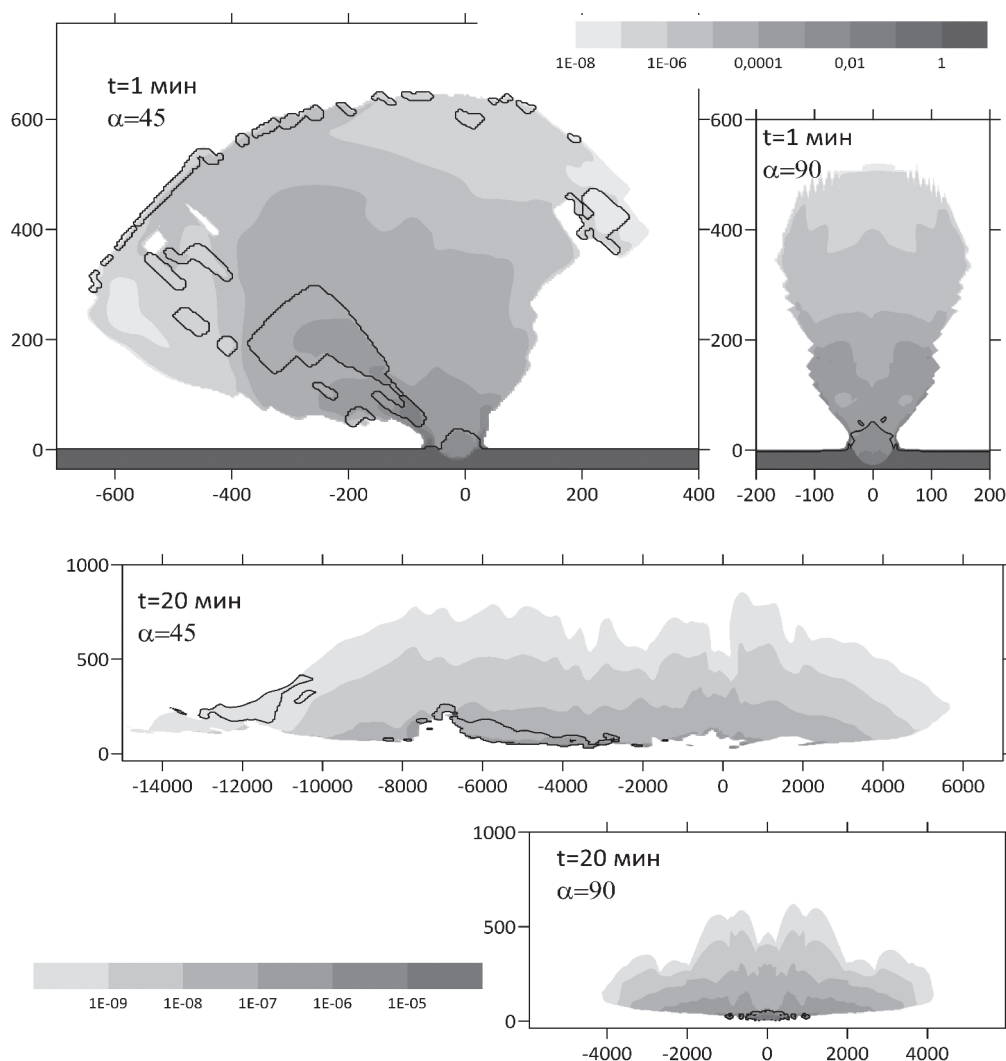
Возмущение Шумановского резонанса, вызванное молниевыми разрядами при извержении вулкана Тонга 15.01.2022

**Публикации:**

1. *Poklad, Y.V., Ryakhovsky, I.A., Gavrilov, B.G., Ermak, V.M., Kozakova, E.N., & Achkasov, N.S. (2022). Investigation of the reaction of Schumann resonances to short transient geophysical events under the influence of atmospheric electromagnetic noise // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127, e2022JD036820. <https://doi.org/10.1029/2022JD036820>*
2. *Gavrilov, B.G., Poklad, Y.V., Ryakhovsky, I.A., Ermak, V.M., Achkasov, N.S., & Kozakova, E.N. (2022). Global electromagnetic disturbances caused by the eruption of the Tonga volcano on 15 January 2022 // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127, e2022JD037411. <https://doi.org/10.1029/2022JD037411>*

№ 122032900176-3 **Разработка комплексной модели воздействия на внутренние и внешние геосферы внедряющихся космических тел и оценка последствий таких падений**  
(рук. НИР д.ф.-м.н., г.н.с. В. В. Шувалов)

1. Численное моделирование выброса вещества в атмосферу при наклонном падении десятикилометровых астероидов в океан. Проведенные расчеты падения в океан десятикилометровых астероидов со скоростью 20 км/с в океан разной глубины под наиболее вероятным углом наклона траектории 45 градусов показывают, что, как и при вертикальных ударах, в атмосферу выбрасывается большая масса вещества ударника и грунта. При глубинах океана вплоть до 4–5 км масса выброшенного в атмосферу грунта (и максимальная, и остающаяся на высотах более 16 км через 10 мин после удара) не более, чем в 2–3 раза отличается от массы выбросов при падении астероида на твердую поверхность. Масса выбрасываемого в атмосферу при ударе вещества ударника вообще слабо зависит от глубины океана. Кроме того, при ударах в воду в атмосферу выбрасывается большое количество воды и содержащихся в ней солей.



Распределения плотности воды и вещества ударника и грунта в  $\text{г/см}^3$  через 1 и 20 мин после падения десятикилометрового астероида со скоростью 20 км/с под углом  $\alpha = 45$  градусов и вертикально в океан глубиной 4 км. Черная линия показывает границу между водой и веществом ударника и мишени. Все расстояния измерены в километрах

Таким образом, подтверждается сделанный ранее вывод о том, что при падении астероидов размером порядка десяти километров в океан воздействие на атмосферу Земли будет, по-видимому, не менее сильным, чем при падении астероидов на сушу.

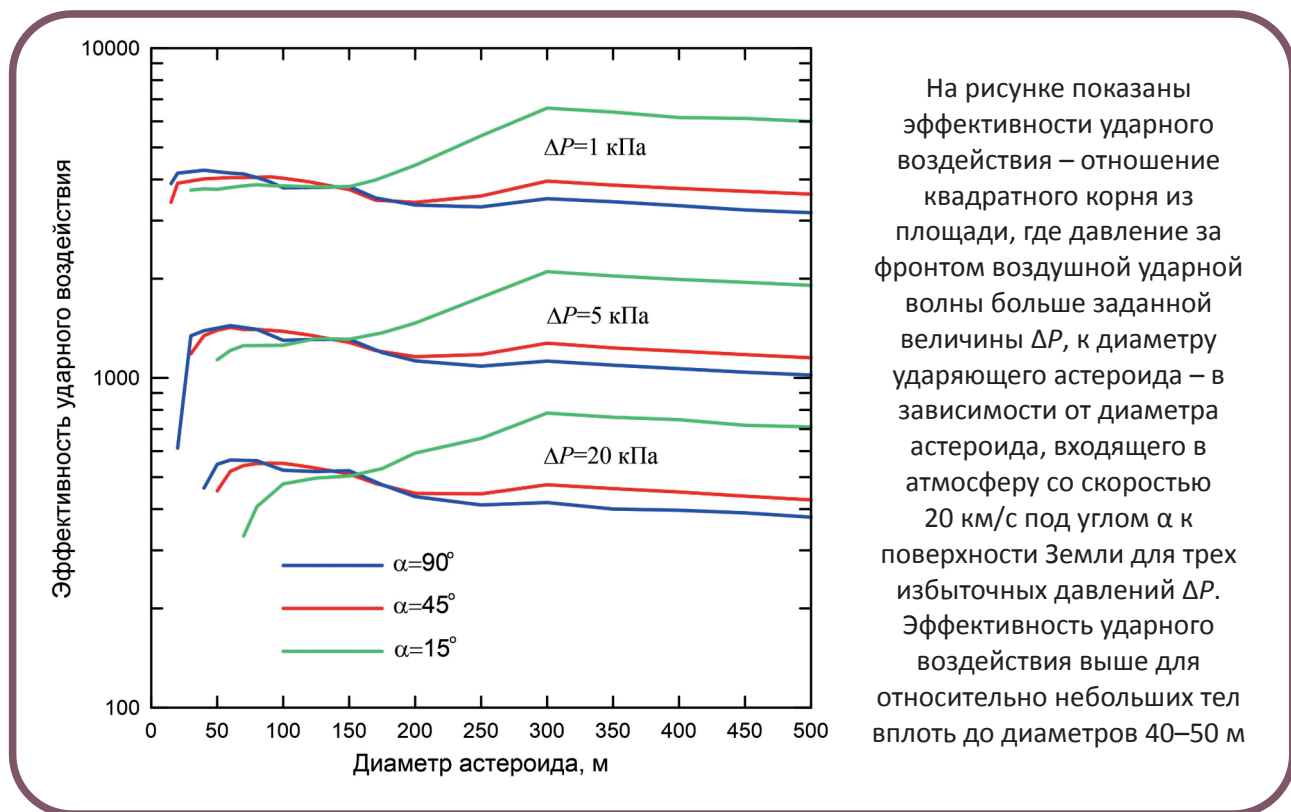
**Автор:** д.ф.-м.н. В. В. Шувалов

**Публикации:**

1. Шувалов В.В. Численное моделирование выброса вещества в атмосферу при наклонном падении десятикилометровых астероидов в океан. Принята к публикации в журнал Физика Земли.

2. Падение на Землю фрагментов разрушенного астероида. Исследовано влияние разрушения астероида на последствия его столкновения с Землей. Показано, что при падении астероидов размером 50–500 м наибольшую площадь разрушений создает воздушная ударная волна. Дробление угрожающего астероида очень близко от Земли, когда астероид входит в атмосферу как компактный рой фрагментов, не снижает ущерба. Если после дробления на более удаленном расстоянии фрагменты входят в атмосферу и воздействуют на объекты Земли независимо друг от друга, то уменьшения общей площади поражения в общем случае можно добиться лишь, если основную массу фрагментов составляют тела размером менее ~30 м, которые не представляют катастрофической опасности. В противном случае суммарная площадь поражения может увеличиться на порядок. Это же касается и дробления астероида на еще более удаленном расстоянии от Земли, когда часть фрагментов не сходит со столкновительных орбит. Если эти фрагменты крупнее ~30 м и суммарная масса этих фрагментов не очень мала, то это не уменьшает угрозы. До сих пор не были известны площади поражений множеством фрагментов. Результаты следует учитывать при разработке стратегии уменьшения угрозы падения астероидов.

**Автор:** д.ф.-м.н. В. В. Светцов



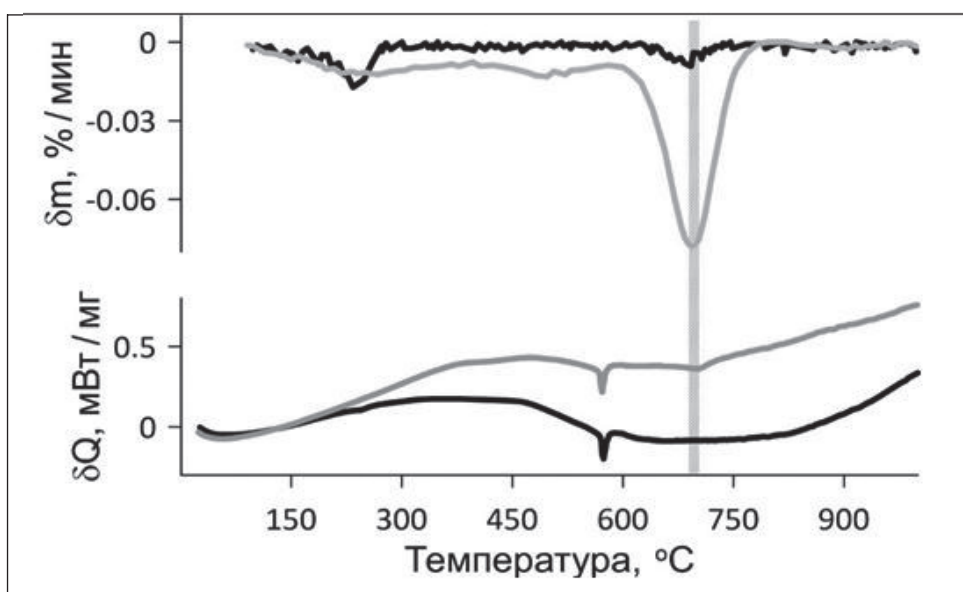
**Публикации:**

1. Светцов В.В. Падение на Землю фрагментов разрушенного астероида // *Астрономический Вестник*. Принята к публикации в журнал *Астрономический вестник*.

№ 122032900178-7 **Возникновение и развитие динамической неустойчивости в зонах крупных континентальных разломов под действием природных и техногенных факторов**  
(рук. НИР к.ф.-м.н., в.н.с. А. А. Остапчук)

1. Масштаб рассматриваемых в проекте задач охватывает множество геологических объектов: от изучения взаимодействия локальных контактов частиц–заполнителей разломов, до моделирования процессов образования и эволюции гигантских метеоритных кратеров от момента удара до наблюдаемой в настоящее время формы с учетом различных моделей трения. Исследование ударных кратеров на Луне и других планетах земного типа позволяют расширять наши представления о механике крупномасштабных деформационных процессов, а отсутствие воды и другая сила тяготения позволяют уточнять факторы, определяющие явление динамического снижения трения в горных породах.

Приведены результаты анализа и систематизации данных о строении крупных разломов на текущем этапе. Данные бурения и геологического обследования денудированных участков разломных зон демонстрируют наличие радикально отличающихся по структуре, материальному составу и фрикционным характеристикам участков скольжения разломов, которые с известной долей условности называют – «сильные» и «слабые». При проведении сейсмологических наблюдений «сильные» области проявляются в виде топологически плотных кластеров гипоцентров фоновой сейсмичности.



Результаты синхронного термического анализа (СТА) образцов кварцевого песка, извлеченных до (черная линия) и после (серая линия) эксперимента по деформированию контактов скальных пород метрового масштаба из зон интенсивного контактного взаимодействия ( $m$  – относительное изменение массы образца при нагревании,  $Q$  – удельное количество подводимого к образцу тепла)

СТА показывает, что при температуре 700 °С (выделенная область) в образце заполнителя, извлеченном после эксперимента, произошли изменения, заключающиеся в потере массы на 1.07 %, в то время как в исходном образце потеря массы при этой же температуре незначительна – 0.03 %. Данные изменения вызваны структурной перестройкой кристаллов кварца с образованием его новой модификации тридимита при локальном нагревании свыше 700° С



В лабораторных экспериментах исследовались закономерности деформирования контактов скальных пород метрового масштаба с неоднородной структурой. Показано, что мода скольжения определяется такими факторами, как геометрия берегов разлома, пространственное распределение фрикционных свойств бортов и заполнителя, скорость приложения нагрузки. Крупномасштабная волнистость берегов разлома определяет зоны, в которых локализовано наиболее интенсивное контактное взаимодействие и, которые проявляются в виде зон с наиболее интенсивным излучением акустических импульсов. В зонах контактного взаимодействия имеет место как дробление зерен, так и модификация материала, связанная с локальным нагревом в ходе динамической подвижки.

Рассмотрены вопросы геолого-геофизического воздействия образования сложных кратеров на геосфере Земли, преобразования вещества поверхности Венеры при ударном воздействии падения космических тел. Изучение и анализ позволит, по-видимому, сделать более определенные выводы по свойствам приповерхностных горных пород на Венере.

**Авторы:** д.ф.м.н. Г. Г. Кочарян, кандидаты физ.-мат. наук А. А. Остапчук, Д. В. Павлов, аспирант Г. А. Гридин

**Публикации:**

1. Ustinov S., Ostapchuk A., Svecherevskiy A., Usachev A., Gridin G., Grigor'eva A., Nafigin I. Prospects of Geoinformatics in Analyzing Spatial Heterogeneities of Microstructural Properties of a Tectonic Fault // Applied Sciences, 2022, vol. 12, No. 6, p. 2864.

[DOI: 10.3390/app12062864](https://doi.org/10.3390/app12062864).

2. Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Гридин Г.А., Морозова К.Г., Hongwen J., Пантелеев И.А. Лабораторные исследования закономерностей фрикционного взаимодействия блоков скальной породы метрового масштаба. Методика и первые результаты // Физика Земли. 2022. № 6. С. 162–174. <https://doi.org/10.31857/S0002333722060060>

**№ 122032900183-1 Распространение светового излучения в рассеивающей сильно турбулентной тропосфере Земли**

(рук. НИР д.ф.-м.н., зав. лаб. Атмосферной адаптивной оптики В. А. Кудряшов)

1. Комбинированная адаптивная оптическая система, состоящая из корректора наклонов и системы коррекции aberrаций волнового фронта (рис. 1). Стабилизатор положения светового пучка необходим для исключения смещений пучка, вызываемых атмосферной турбулентностью. Стабилизация осуществляется с помощью двух зеркал, способных изменять наклон по двум осям под воздействием электрического напряжения, приложенного к актюаторам зеркала. Диапазон стабилизации составляет +/- 100 мкм, частота коррекции – до 500 Гц. Вторая половина комбинированной системы представляет собой замкнутую адаптивную оптическую систему коррекции aberrаций волнового фронта светового излучения. Коррекция осуществляется в реальном масштабе времени с частотой до 1000 Гц, точность коррекции  $\lambda/10$ , где  $\lambda$  – длина волны светового излучения.

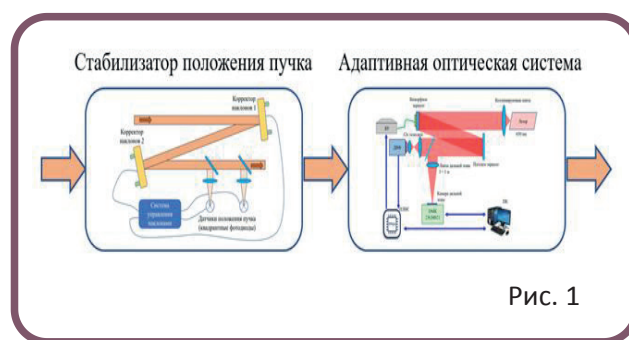


Рис. 1

Исследованы спектральные характеристики динамики наклонов волнового фронта светового излучения, вызванных турбулентностью. На рис. 2 (см. на стр. 19) представлен пример измеренной спектральной плотности мощности наклонов волнового фронта при воздействии на световой пучок турбулентным воздушным потоком.

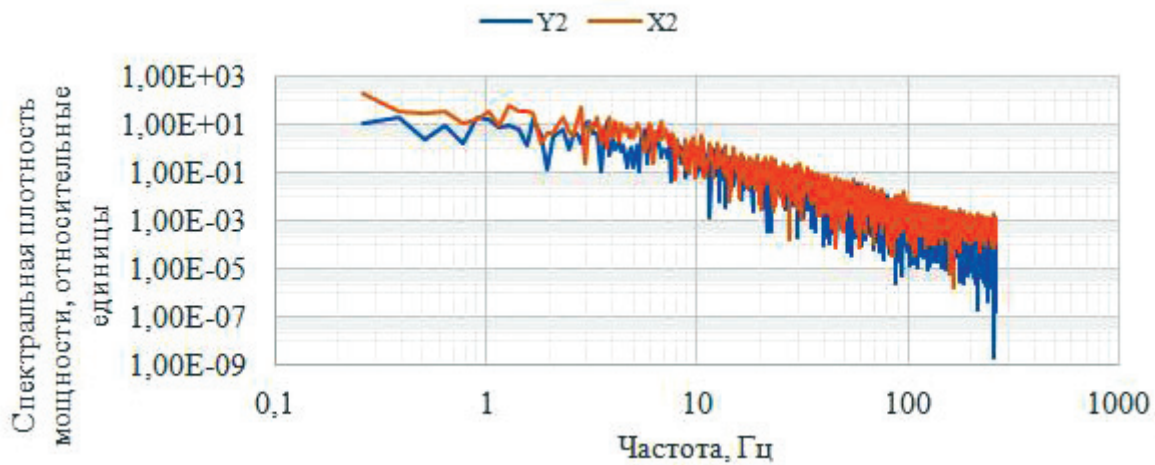


Рис. 2

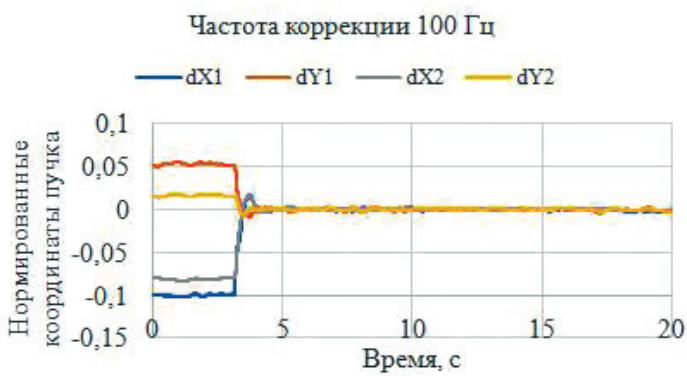


Рис. 3

На рис. 3 показан график смещения угловых координат светового пучка во времени. Вначале коррекция отсутствует, затем включается корректор, и положение пучка в пространстве стабилизируется.

Проведены исследования эффективности коррекции волнового фронта светового излучения с помощью комбинированной адаптивной оптической системы. Эффективность коррекции изображена на рис. 4, где полиномы Цернике №№ 1 и 2 соответствуют наклонам волнового фронта.



Рис. 4

При использовании стандартной адаптивной оптической системы на основе биморфного зеркала коррекция наклонов отсутствует, что приводит к нестабильному положению светового пучка в пространстве. Это может сказываться на точности работы оптических приборов, стоящих после адаптивной оптической системы.

**Авторы:** д.ф.-м.н. А. В. Кудряшов, кандидаты физ.-мат. наук А. Л. Рукосуев, И. В. Галактионов, Ю. В. Шелдакова, н.с. А. Н. Никитин

#### Публикации:

1. *Sheldakova J., Galaktionov I., Nikitin A., Alexandrov A., Kudryashov A., Belousov V., Rukosuev A.* FPGA based laser beam stabilization system. (2022). Proc. SPIE: 11987, pp. 119870C. [Doi: 10.1117/12.2614525](https://doi.org/10.1117/12.2614525).
2. *Klochkova V., Sheldakova J., Galaktionov I., Nikitin A., Kudryashov A., Belousov V., Rukosuev A.* Local Correction of the Light Position Implemented on an FPGA Platform for a 6 Meter Telescope // Photonics. 2022. 9(5), p. 322. [Doi: 10.3390/photonics9050322](https://doi.org/10.3390/photonics9050322).

### № 122032900184-8 Исследование процессов в ионосфере при воздействии рентгеновского и гамма-излучения Солнца

(рук. НИР к.т.н., зам. директора по научной работе А. Н. Ляхов)

1. *Создание юстировочного источника жесткого излучения для экспериментальной проверки теоретических моделей ионизации.* Предложено использовать в качестве юстировочного источника жесткого УФ и мягкого рентгеновского излучения множественную инжекцию плазменных струй в ионосфере Земли, с использованием взрывных генераторов плазменных струй, созданных в ИДГ РАН в конце 90-х годов прошлого столетия. Результаты численного моделирования в рамках радиационной гидродинамики показали принципиальную осуществимость такой схемы.

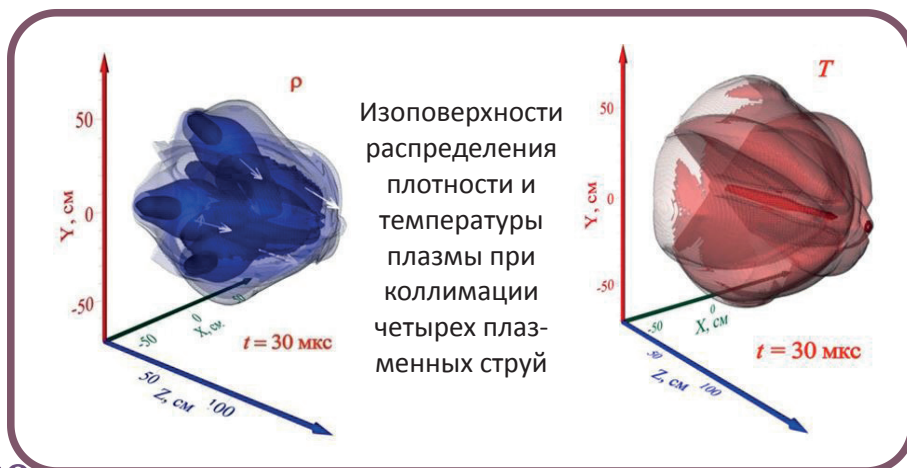
Численное моделирование показало, что коллимационная инжекция плазменных струй в ионосфере Земли позволяет создавать юстировочный источник интенсивного жесткого УФ и мягкого рентгеновского излучения для проведения контрольных экспериментов в интересах верификации теоретических моделей ионизации.

Представленные результаты моделирования коллимации четырех струй показывают, что к моменту времени 30 мкс средняя температура в струе, образовавшейся в результате взаимодействия четырех струй становится более, чем на порядок выше, чем в одиночной струе и составляет величину 140000 К. Это приводит к существенному изменению оптических характеристик плазмы. Суммарные струи батарейных генераторов смещают спектры излучения плазмы в более коротковолновую область длин волн, включая вакуумный ультрафиолет (10–200 нм).

**Авторы:** кандидаты физ.-мат. наук Т. В. Лосева, И. Б. Косарев, Ю. В. Поклад, к.т.н. А. Н. Ляхов, д.ф.-м.н. Ю. И. Зецер, м.н.с. Е. М. Урвачев

#### Публикации:

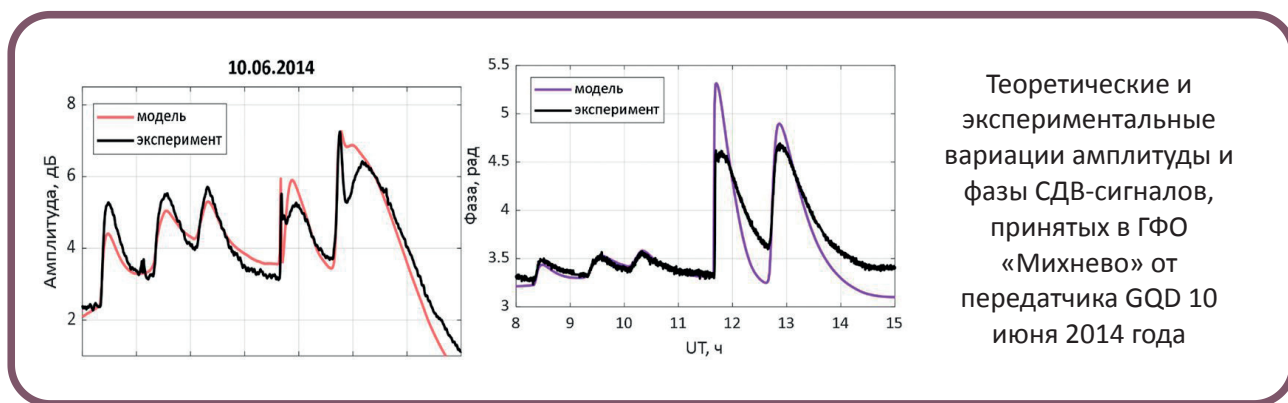
1. *Лосева Т.В., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И., Урвачев Е.М.* Численное моделирование начальной стадии динамики высокоскоростной плазменной струи в активных геофизических ракетных экспериментах «Флакрус» и «Северная звезда» // Физика плазмы. 2022. 48(10). С. 956–961. [DOI: 10.31857/S0367292122600583](https://doi.org/10.31857/S0367292122600583)





2. *Прогностическая плазмохимическая модель нижней ионосферы.* В целях решения фундаментальной проблемы солнечно-земных связей и исследования влияния солнечной активности на климат средней атмосферы Земли разработана новая плазмохимическая ассимиляционная модель нижней ионосферы. В основу модели положена схема ионизационно-рекомбинационного цикла, входными данными которой являются спутниковые наблюдения за параметрами нейтральной атмосферы (ИСЗ AURA) и потоками жесткого электромагнитного излучения Солнца (ИСЗ GOES и SDO). Для повышения точности получаемых результатов в этом году был определен принципиальный набор фотохимических реакций, на которых строится модель, и уточнены значения некоторых констант скоростей реакций. Верификация результатов численного моделирования по данным наземных радиофизических измерений ГФО «Михнево» показала, что модель позволяет корректно воспроизвести отклик параметров нижней ионосферы на рентгеновские вспышки различных классов на большинстве рассмотренных трасс, поэтому в том числе она может быть успешно использована для решения задач прогноза распространения СДВ-сигналов.

**Авторы:** к.ф.-м.н. С. З. Беккер, д.ф.-м.н. С. И. Козлов, к.ф.-м.н. В. П. Кудрявцев



Теоретические и экспериментальные вариации амплитуды и фазы СДВ-сигналов, принятых в ГФО «Михнево» от передатчика QD 10 июня 2014 года

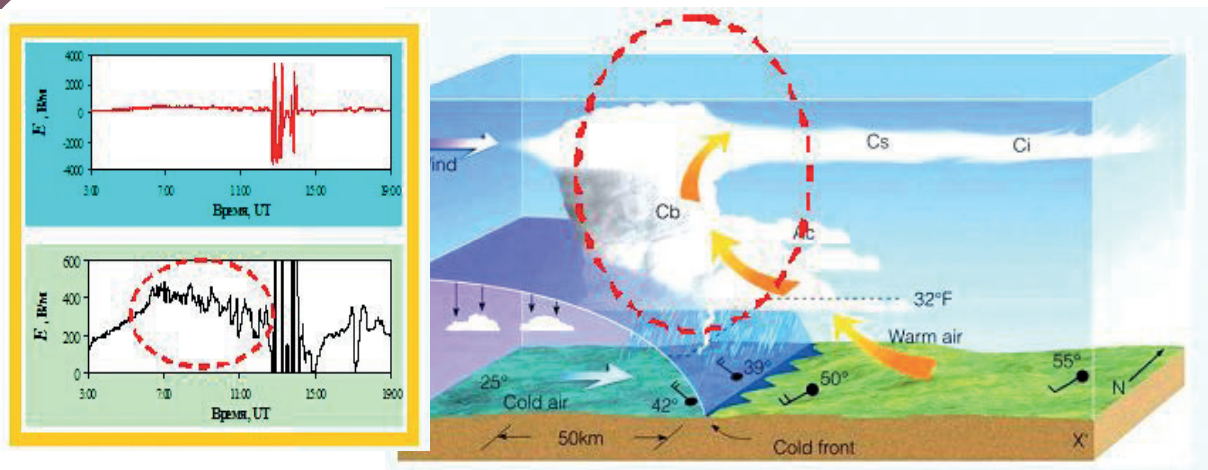
#### Публикации:

1. Bekker S.Z., Kozlov S.I., Kudryavcev V.P. Comparison and Verification of the Different Schemes for the Ionization-Recombination Cycle of the Ionospheric D-Region // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2022. 127. e2022JA030579. <https://doi.org/10.1029/2022JA030579>
2. Беккер С.З. Верификация плазмохимических моделей D-области ионосферы по радиофизическим данным геофизической обсерватории Михнево // Геомагнетизм и аэронавигация. 2022. Т. 62. №3. С. 365–373. <https://doi.org/10.31857/S001679402202002X>

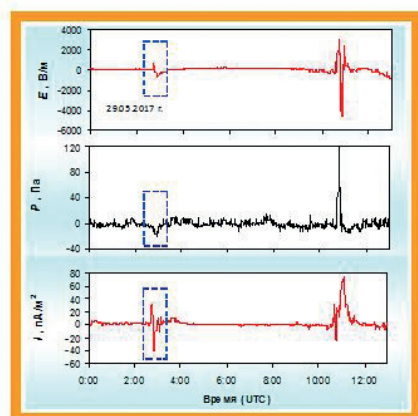
#### № 122032900185-5 Разработка прогностических признаков опасных атмосферных явлений (рук. НИР д.ф.-м.н., в.н.с. С. П. Соловьев)

На основе результатов комплексных инструментальных наблюдений предложены прогностические признаки сильных атмосферных явлений с опасными последствиями (ураганы, шквалы, сильные грозы) в виде характерных микробарических вариаций и их импеданса, а также вариаций геофизических полей (магнитное, электрическое), регистрируемых за 5–8 часов до прихода фронта в точку наблюдений в период прихода атмосферного сигнала, распространяющегося по волноводу и за 1.5–2 часа до прихода фронта в период прихода атмосферного сигнала лучевого распространения. Полученные данные могут быть использованы при установлении источников аномального поведения полей и условий, определяющих интенсивность межгеосферных взаимодействий, а также при разработке теоретических и расчетных моделей опасных атмосферных явлений и на их основе мероприятий МЧС по уменьшению вызываемых ими негативных и катастрофических последствий.

**Авторы:** кандидаты физ.-мат. наук Ю. С. Рыбнов, С. А. Рябова, доктора физ.-мат. наук С. П. Соловьев, А. А. Спивак, к.т.н. В. А. Харламов



Вариации электрического поля, вызванные ураганом в г. Москве 29.05.2017 г.



Вариации напряженности электрического поля, атмосферного давления и плотности атмосферного тока при прохождении атмосферного фронта

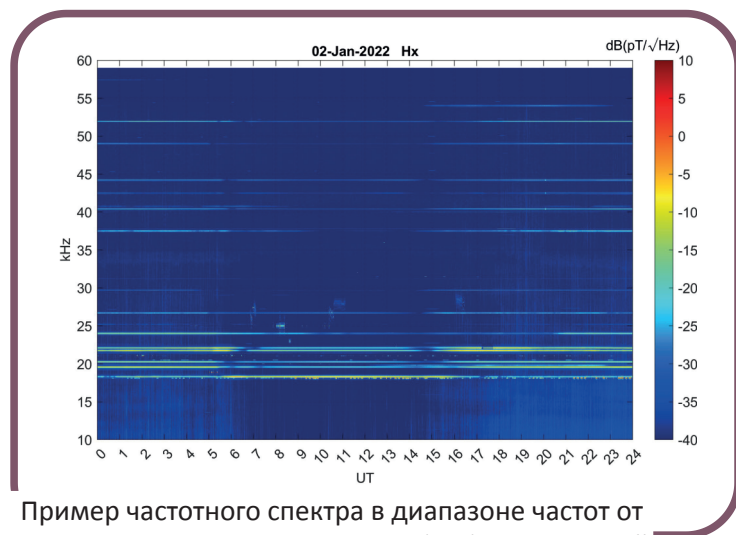
#### Публикации:

1. Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А. Комплексный прогностический признак опасных атмосферных явлений // Доклады академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 504. № 1. С. 69–74. <https://doi.org/10.31857/S2686739722050152>
2. Спивак А.А., Рябова С.А. Геофизические эффекты атмосферных сильных фронтов // Доклады академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 1. С. 24–29. <https://doi.org/10.31857/s268673972201008x>
3. Спивак А.А., Овчинников В.М., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А., Харламов В.А. Сейсмические, атмосферно-волновые, электрические и магнитные эффекты мощных атмосферных фронтов // Физика Земли. 2022. № С. 56–70. <https://doi.org/10.31857/S0002333722040111>

## Геофизическая обсерватория ИДГ РАН «МИХНЕВО»

С конца 2011 года в ГФО «Михнево» ИДГ РАН ведется непрерывная регистрация электромагнитных сигналов в КНЧ/ОНЧ диапазоне. В низкочастотном диапазоне в качестве датчиков используются индукционные магнитометры MFS-06 и MFS-07 (фирмы Metronix), ориентированные в направлении магнитный Север-Юг и Запад-Восток. Магнитометры MFS-06 имеют крайне низкий собственный уровень шумов. Регистрация ведется на 10 канальный 24-разрядный логгер ADU-07 с частотой оцифровки 256 Гц. Временная привязка осуществляется средствами ГНСС с точностью 30 нс. Аппаратура размещена в лесу, на расстоянии около 500 м от ближайших источников промышленной сети.

Низкий уровень промышленных шумов в геофизической обсерватории «Михнево», высокая чувствительность и широкий динамический диапазон аппаратуры позволяют принимать сверхслабые сигналы. Частотный диапазон принимаемых сигналов от  $10^3$  Гц до 60 кГц. В диапазоне 10–59 кГц принимаются сигналы СДВ передатчиков, расположенных по всему миру.



Пример частотного спектра в диапазоне частот от 10 до 60 кГц, полученного при обработке суточной записи сигнала Hx (Север-Юг)

Мониторинг параметров сигналов на двухчастотной СДВ трассе GQD/GBZ – «Михнево» (передатчики GQD и GBZ расположены в Великобритании на расстоянии около 40 км друг от друга) позволяет восстанавливать параметры ионосферы во время Солнечных рентгеновских вспышек в рамках двухпараметрической модели Фергюссона-Уайта. Было проведено исследование влияния жесткости рентгеновского излучения на вариацию эффективной высоты отражения на трассе распространения сигнала. Показано, что именно жесткое излучение в диапазоне до 0.2 нм является главным фактором, приводящим к изменению высоты эффективного отражения.

Использование для оценки эффектов солнечных вспышек данных по изменению параметров ОНЧ радиоизлучения на двухчастотной трассе, дополненное исследованием яркостной температуры рентгеновского излучения, является эффективным инструментом изучения состояния и динамики нижней ионосферы в различных гелиогеофизических условиях и может использоваться для получения надежных экспериментальных данных для верификации теоретических моделей ионосферы.

### Публикации:

1. Гаврилов Б.Г., Поклад Ю В., Ряховский И.А., Ермак В.М. Зависимость возмущений D-области среднеширотной ионосферы от спектрального состава рентгеновского излучения солнечных вспышек по экспериментальным данным // Геомагнетизм и аэрномия. 2022. Т. 62, № 2. С. 239–244. [DOI 10.31857/S0016794022020080](https://doi.org/10.31857/S0016794022020080).

## РОССИЙСКИЙ НАУЧНЫЙ ФОНД

№ 22-17-00204 Геомеханика разломов земной коры – от региональных масштабов до микротрещин

(рук. проекта д.ф.-м.н. Г. Г. Кочарян)

Проект направлен на решение фундаментальной научной проблемы – развитие механики деформационных процессов в разломных зонах с целью построения расчетной модели, основанной на физических принципах и успешно выполняющей прогностические функции.

Создана уникальная в России экспериментальная установка метрового масштаба, позволяющая проводить инструментальный контроль развития деформационных процессов в зонах лабораторных разломов с пространственно-неоднородной структурой, включая участки, содержащие области зацепления (*asperity*).

В результате тестовых экспериментов на блоках из различных материалов и численных расчетов в 2022 году была разработана единая концепция проведения лабораторных и численных экспериментов. Суть концепции заключается в такой постановке опытов и расчетов, которая позволяет контролируемым образом задавать режим скольжения заданной области контакта, а также проследить взаимодействие разных режимов скольжения и структурных областей.

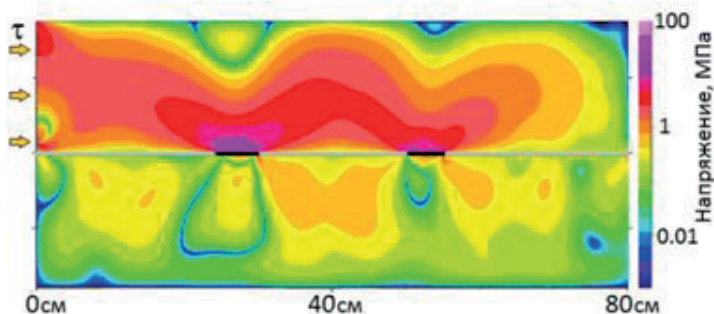
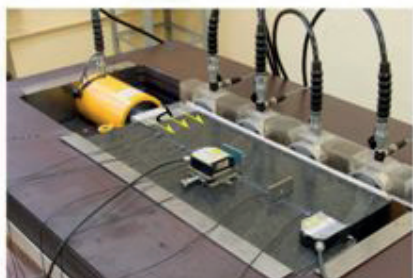


Фото контакта блоков скальных пород в процессе проведения лабораторных экспериментов (слева) и распределение напряжений в окрестности очагов лабораторных землетрясений (справа)

Эксперименты, проведенные в 2022 г., продемонстрировали, что мода скольжения по лабораторному разлому определяется такими факторами, как геометрия берегов разлома, пространственное распределение фрикционных свойств бортов и заполнителя, скорость приложения нагрузки. В областях скольжения тектонических разломов выделяются нерегулярные, неизменяемые в течение длительного времени сейсмогенерирующие структурные формы, расположение которых, наряду с геометрическими факторами, определяется гетерогенностью фрикционных характеристик центральной части разлома.

Создана вычислительная программа, позволяющая с требуемой степенью детализации воспроизводить условия нагружения блоков в лабораторной установке (неравномерность нормальной нагрузки на блоки, связанную с использованием нескольких домкратов, различное количество и расположение пятен *asperities* и т.д.) и исследовать параметры движения и напряженного состояния блоков в ходе опыта.



Проведена серия численных расчетов; получены поля напряжений и деформаций при имитации различных режимов воздействия сдвигающего домкрата в лабораторной установке. Интересно, что разрушение цементного пятна происходит нетривиальным образом: разрыв начинается с края и распространяется медленно, достигая лишь ~15% размера пятна; затем, со значительным запаздыванием происходит быстрое разрушение всего *asperity* и динамическая подвижка. Такой результат коррелируется с эффектами, наблюдаемыми в лабораторном эксперименте.

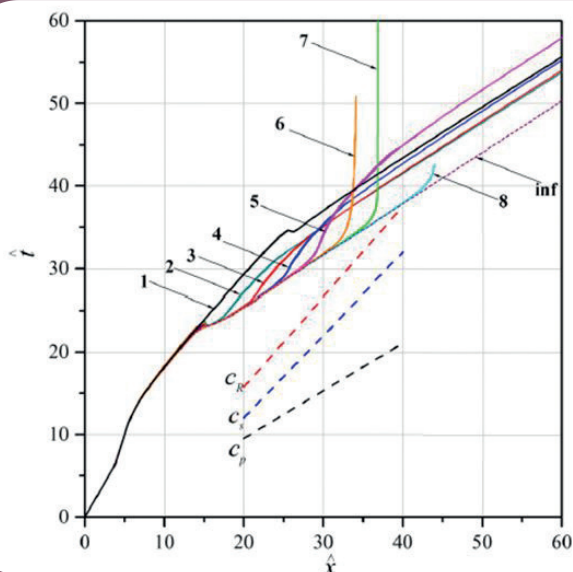
**Публикации:**

1. Гридин Г. А., Кочарян Г. Г., Морозова К. Г., Новикова Е. А., Остапчук А. А., Павлов Д. В. Развитие процесса скольжения по гетерогенному разлому. Крупномасштабный лабораторный эксперимент. Принята к публикации в журнал Физика Земли.

**№ 22-27-00565 Влияние неоднородности фрикционных свойств интерфейса на динамику распространения разрыва и излучение сейсмических волн**

(рук. проекта к.ф.-м.н. С. Б. Кишкина)

Целью проекта является исследование закономерностей распространения разрыва и излучение сейсмических волн при подвижке по разлому, магистральный сместитель которого на разных участках выполнен геоматериалом с разными фрикционными свойствами. Подобное строение сейсмогенных разрывов характерно для очагов неглубоких тектонических землетрясений. Неоднородность фрикционных свойств может вызвать замедление вплоть до остановки или наоборот локальные увеличения скорости распространения разрыва, вплоть до значений, превышающих скорости распространения поперечных волн во вмещающем массиве. Землетрясения, при которых скорость распространения разлома выше, чем скорость сейсмических сдвиговых волн, называют «быстрыми» или «сверхзвуковыми» (так называемый режим *supershear* или сверхсдвиговый режим). Эти события редки, но они могут быть очень разрушительными из-за связанного с ними сильного сотрясения грунта. Понимание того, как и почему они происходят, может развить представления о механике разломов. Механика и закономерности этих процессов исследованы недостаточно, хотя они оказывают сильное влияние как на параметры высокочастотных сильных движений грунта в ближней зоне землетрясения, так и на макроскопические параметры очага.



На рисунке приведены годографы момента начала активной стадии (начало скольжения), полученные в расчетах со стабильными участками разной протяженности ( $\Delta x^* = 0$  (1), 14.8 (5); 18.5 (6), 29.6 (8); inf — весь участок со стабильным трением).

При больших размерах участка с постоянным трением ( $\Delta x \geq 18.5$ ) разрыв останавливается (распространение разрыва на VS участке не сопровождается выделением упругой энергии, запасенной в блоке, и, следовательно, связанная с разрывом сейсмическая волна постепенно затухает)

В ходе исследований проанализированы результаты накопленных в мире за последние годы сведений о распространении «быстрых» разрывов при землетрясениях, проведено их качественное сопоставление с результатами численных расчетов формирования сверхдвигового разрыва вдоль однородной и гетерогенной поверхностью разрыва.

Показано, что в случае гетерогенной поверхности контакта необходимым условием трансформации разрыва в сверхдвиговый режим является наличие достаточного количества пятен асперити (*asperities*), для которых характерно быстрое фрикционное разупрочнение контакта при сдвиге. В случае неоднородной поверхности возможно появление интервалов снижения и увеличения скорости распространения разрыва. Систематическое изменение свойств разлома вдоль его простирания приводит к увеличению вероятности возникновения сверхдвиговых разрывов на более древних участках поверхности контакта.

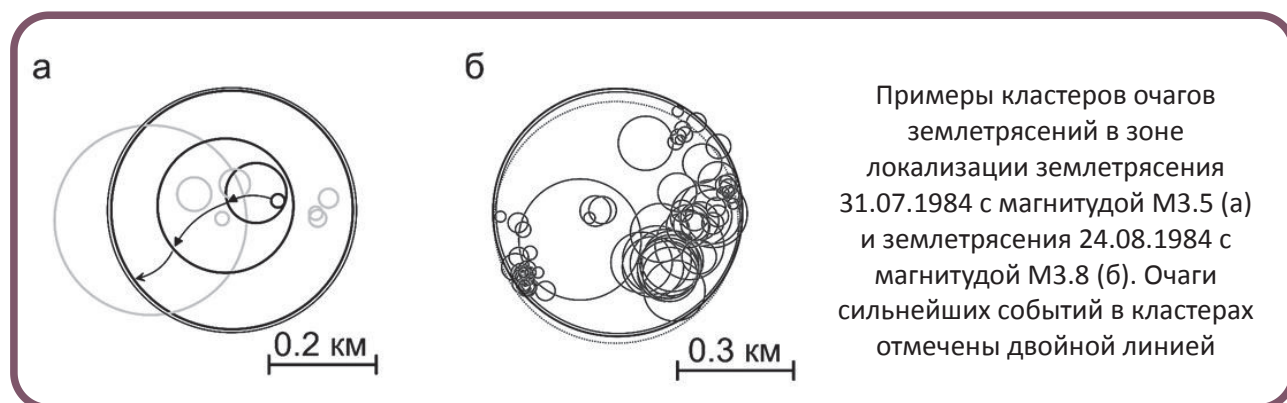
Судя по результатам расчетов, на шероховатых/волнистых участках контактных поверхностей, с близко расположенными зонами фрикционного разупрочнения, генерация сверхдвигового разрыва более вероятна. При этом распространение такого разрыва с затухающей амплитудой смещения может быть устойчиво на локально более гладких участках.

#### Публикации:

1. Кочарян Г.Г., Будков А.М., Кишкина С.Б. Влияние структуры зоны скольжения разлома на скорость распространения разрыва при землетрясении // Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25, № 4. С. 84–93. [https://doi.org/10.55652/1683-805X\\_2022\\_25\\_4\\_84](https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_4_84)
2. Будков А.М., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г. Моделирование сверхдвигового режима распространения разрыва по разлому с гетерогенной поверхностью // Физика Земли. 2022. № 4. С. 135–150. <https://doi.org/10.31857/S0002333722040019>

#### № 20-77-10087 Применение современных методов анализа данных для решения задач геомеханики разломных зон приповерхностной области континентальной коры (рук. проекта к.ф.-м.н. А. А. Остапчук)

Фундаментальной проблемой, на решение которой направлен настоящий проект, является установление ключевых параметров, факторов и механизмов, определяющих закономерности возникновения и эволюции различных режимов скольжения разломов. При этом применение современных методов машинного обучения для обработки больших объемов геолого-геофизической информации позволяет существенно улучшить наше понимание механики возникновения и пространственно-временные закономерности вариации режимов скольжения. В рамках работ по проекту разработан новый подход к анализу пространственных закономерностей локализации сейсмичности, обусловленный структурными особенностями разломов земной коры.



Был модернизирован алгоритм топологической фильтрации, в основе которого лежит алгоритм DPS-фильтрации, разработанный под руководством академика А. Д. Гвишиани. Введение двух критических условий, основанных на «геологическом понимании» структуры разломов позволяет определять зону локализации и размер контактных пятен в автоматическом режиме. Все контактные пятна, в пределах которых инициированы землетрясения с  $M > 5$ , характеризуются иерархической структурой со свойством статистического самоподобия.

#### Публикации:

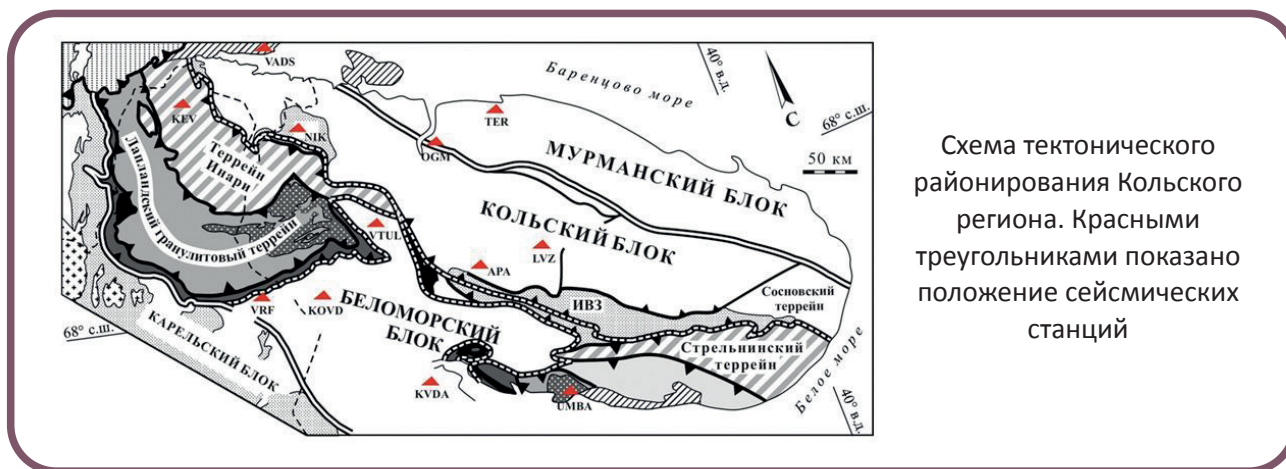
1. Ostapchuk A, Polyatykin V, Popov M and Kocharyan G (2022) Seismogenic Patches in a Tectonic Fault Interface. *Front. Earth Sci.* 10:904814.

[Doi: 10.3389/feart.2022.904814](https://doi.org/10.3389/feart.2022.904814).

2. Кочарян Г.Г., Остапчук А.А. Мезоструктура зоны скольжения тектонического разлома // Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25. №5. С. 94–105. [https://doi.org/10.55652/1683-805X\\_2022\\_25\\_5\\_94](https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_5_94).

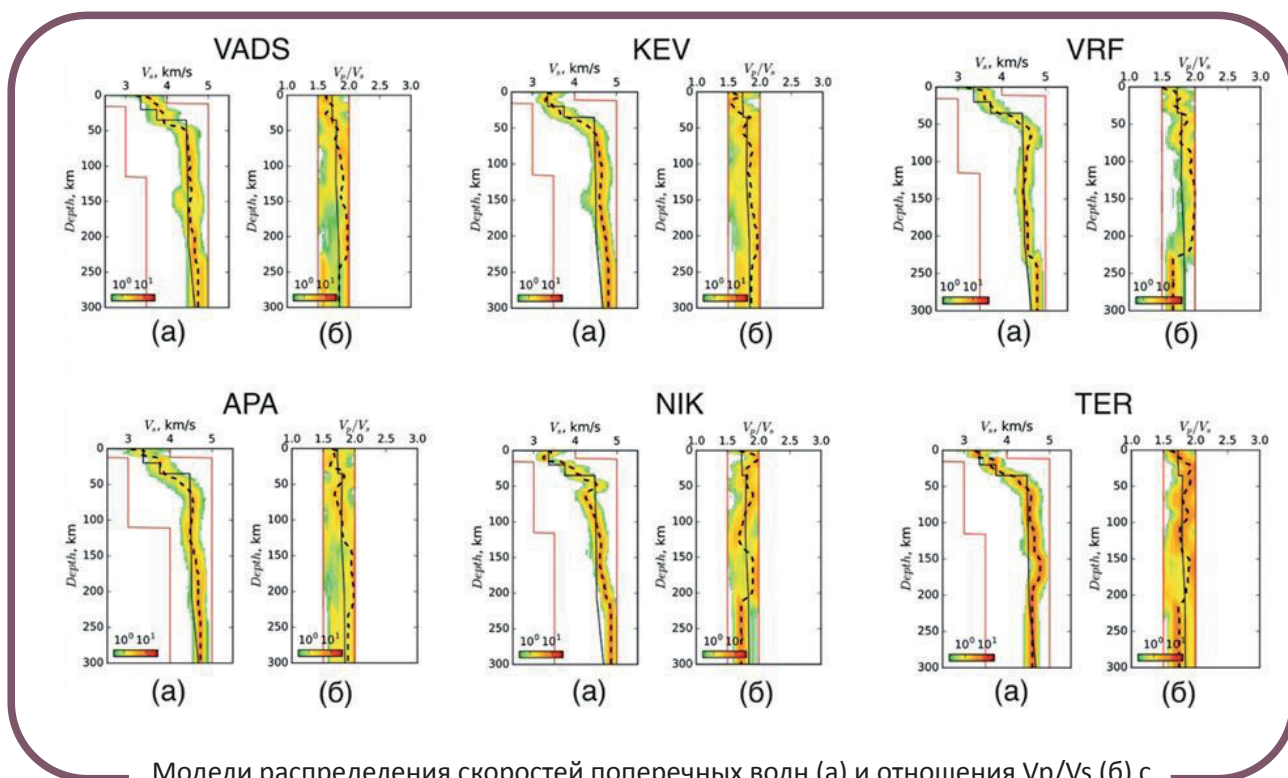
#### № 21-17-00161 Разработка пространственной структурно-динамической модели взаимодействия приповерхностных геологических форм и геофизических процессов с глубинными неоднородностями земной коры и верхней мантии центральной и арктической частей Кольского полуострова (рук. проекта академик РАН В. В. Адушкин)

В 2022 году продолжена работа по созданию и поддержанию работоспособности новой сейсмической сети в центральной части Кольского региона. За отчетный период была открыта новая широкополосная станция «Огни Мурманска», расположенная в Мурманском мегаблоке. Таким образом, совместно с тремя ближайшими станциями мировой сети, новая площадная широкополосная сейсмическая сеть насчитывает 12 сейсмических станций, равномерно распределённых по изучаемой территории, что позволяет эффективно решать как задачи контроля за сейсмичностью региона, так и широкий спектр задач структурной сейсмологии.



На основе совместного анализа PRF и SRF были построены одномерные модели  $V_s$  и отношения  $V_p/V_s$  земной коры и верхней мантии до глубины 300 км по данным станций VRF, KEV, VADS, NIK, TER, APA и LVZ. Обнаружено, что коро-мантийный переход для центральной части Кольского региона представлен переходной зоной, мощностью около 15 км с подошвой на глубине 50–52 км для западной и северной частей изучаемой территории. Исключением являются результаты моделирования данных станций NIK и VADS. В первом случае коро-мантийный переход выявлен единой границей на глубине 41 км, во втором – на глубине 44 км.

По результатам анализа полученных в рамках проекта новых глубинных моделей выявлена существенная гетерогенность литосферы Кольского региона. В северо-западной части изучаемой области, по данным станций VADS и KEV, обнаруживается выраженная тенденция к понижению скоростей на глубинах 120–170 км. В юго-западной части изучаемой территории (станция VRF) скорости  $V_s$  оцениваются как относительно пониженные на глубинах 80–200 км. В центральной части Кольского региона (станция NIK), как и на его северо-восточной окраине (станция TER), пониженные скорости ниже глубины 100 км не выявляются. В юго-восточной части (станции APA и LVZ), отмечается слой относительно пониженных скоростей на глубинах 90–140 км. Выявляется также особенность распределения значений отношения  $V_p/V_s$ , являющихся одним из маркеров вещественного состава мантийных пород. В западной части Кольского региона значения оцениваются как повышенные, начиная с глубин около 80 и до 240 км, тогда как в остальной части изучаемой территории повышенные  $V_p/V_s$  отмечаются на глубинах 140–220 км. Отдельное внимание уделено изучению Печенгской рудоносной структуры. В модели отношения  $V_p/V_s$ , полученные по данным расположенной в ней станции NIK, отмечаются аномально высокие значения, достигающие 1.99, на глубинах 5–20 км. Такие высокие значения характерны для пород примитивной мантии, что позволяет предположить маркирование древней промежуточной магматической камеры или реликта подводящего канала палеозойского мантийного плюма, признаки которого в Печенгской структуре отмечены по комплексу изотопно-геохимических исследований, развиваемых в рамках представленного проекта. Также это предположение подтверждается тем, что станция установлена в 2 км от крупнейшего медно-никелевого месторождения, генезис которого связывается с плюм-литосферным взаимодействием. За второй год выполнения проекта по результатам картирования групповых скоростей поверхностных волн в диапазоне периодов 10–250 с, выполненного ранее, в заданных с учетом разрешения точках в пределах области исследования (15°–54° E, 60°–80° N) построены локальные дисперсионные кривые волн Рэлея и Лява и проведена их инверсия в скоростные разрезы поперечных волн SV и SH соответственно.



Модели распределения скоростей поперечных волн (а) и отношения  $V_p/V_s$  (б) с глубиной до 300 км. Цветами показаны поля сгущения индивидуальных минимизированных случайных моделей. Пунктирными линиями показаны медианные модели. Красные линии обозначают границы формирования случайных начальных моделей; черные – представляют модель IASP91



По полученным скоростным разрезам был рассчитан коэффициент радиальной анизотропии, характеризующий разницу скоростей волн SV и SH. В результате было установлено, что практически во всем диапазоне исследуемых глубин (до 500 км) верхняя мантия под Балтийским щитом, Русской плитой и большей частью Баренцева моря характеризуется высокими скоростями волн SV. Минимальные скорости при этом приурочены к архипелагу Шпицберген с прилегающими к нему территориями на глубинах 80–250 км и к Южно-Баренцевской впадине в интервале глубин 80–100 км.

Верхняя мантия под рассматриваемым регионом обладает анизотропными свойствами до глубины 400 км. Максимальные значения коэффициента радиальной анизотропии (до +4%) в интервале глубин 50–80 км наблюдаются в восточной части Баренцева моря, а на глубине 100 км охватывают также его центральную часть. На глубинах 150–300 км максимум смещается на запад Баренцева моря и частично распространяется на север Балтийского щита. При этом мантия под остальной частью рассматриваемой территории на глубинах 50–300 км является либо практически изотропной (–1...+1%) в пределах погрешности исходных данных, либо характеризуется слабой радиальной анизотропией (+1...+2%). С увеличением глубины до 350–400 км слабая радиальная анизотропия сохраняется лишь в центральной части рассматриваемого региона – под отдельными районами Кольского полуострова и прилегающей к нему территорией Баренцева моря. В результате проведенного исследования на основе записей трех землетрясений с магнитудами 4.1 и 2.7 в Хибинском массиве, а также землетрясения с магнитудой 4.2 в Ботническом заливе, получены оценки параметра добротности двумя методами – спектральной инверсии и на основе анализа коды волны S. Методом спектральной инверсии получено пространственное распределение параметра добротности на эпицентральных расстояниях 50–500 км. При этом величина добротности варьируется от 532 до 1200. По коде волны S значения добротности на эпицентральных расстояниях от 22 до 51 км изменяются от 130 до 420 на частоте 1 Гц. Отмечена сильная степенная зависимость. Установлено, что значение добротности по Р волне и ее величина, оцененная по коде волны S, имеют близкие значения в интервале частот 2–3 Гц и лежат в диапазоне 400–700.

#### Публикации:

1. Bayanova T.B., Bazay A.V., Steshenko E.N., Kunakkuzin E.L., Serov P.A., Borisenko E.S., Elizarov D.V. Mesoarchaeal banded iron formations of the Fennoscandian Shield: new zircon U-Pb (ID-TIMS and SHRIMP-II) isotope ages of noble metal mineralization and Nd-Sr data on whole rocks // International Geology Review, 2022. <https://doi.org/10.1080/00206814.2022.2153386>
2. Smolkin V.F., Mokrushin A.V., Bayanova T.B., Serov P.A., Ariskin A.A. Magma feeding paleochannel in the Monchegorsk ore region: geochemistry, isotope U-Pb and Sm-Nd analysis (Kola region, Russia). Journal of Mining Institute. 2022. Vol. 255, p. 405–418. DOI: [10.31897/PMI.2022.48](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.48)
3. Федоров И.С., Асминг С.В., Гоев А.Г., Волосов С.Г. Расширение сети сейсмических наблюдений на Кольском полуострове // Российский сейсмологический журнал. 2022. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.1.05>
4. Гоев, А.Г. О некоторых особенностях границ зоны фазовых переходов в верхней мантии центральной части Кольского полуострова // Доклады Российской академии наук. 2022. <https://doi.org/10.31857/S2686739722600928>
5. Адушкин В.В., Ловчиков А.В., Гоев А.Г. О возникновении катастрофического горно-тектонического удара на руднике «Умбозеро» в Ловозёрском массиве в Центральной части Кольского полуострова // Доклады Российской академии наук. 2022. <https://doi.org/10.31857/S2686739722050036>

#### № 22-27-00643 Исследование распространения и заполнения трещин гидроразрыва при помощи ультразвукового просвечивания

(рук. проекта д.ф.-м.н. С. Б. Турунтаев)

В ходе выполнения проекта была проведена серия лабораторных экспериментов по совместному активному акустическому и деформационному мониторингу трещины гидроразрыва. Эксперименты проводились в модельном материале на основе гипса. Для сравнения были выполнены эталонные эксперименты по исследованию прохождения ультразвуковых волн через заполненную жидкостью щель контролируемой ширины между двумя прецизионными стеклянными пластинами.

Целью экспериментов было исследование зависимости амплитуды ультразвуковой волны, прошедшей через трещину от величины её раскрытия. В этих экспериментах создавалась круговая трещина гидроразрыва. Образец располагался между двумя дисками из алюминиевого сплава, оснащенных вмонтированными в них пьезокерамическими преобразователями, работающими как в режиме излучателя, так и режиме приемника. Через канал в нижнем диске осуществлялась подача рабочей жидкости в трещину. Через верхний диск производилось насыщение образца поровым флюидом. Вся сборка помещалась в гидравлический пресс, обеспечивающий постоянное сжимающее усилие. Величина раскрытия трещины изменялась в зависимости от расхода жидкости, подаваемой в центр трещины, и измерялась по относительному изменению расстояния между дисками сборки при помощи индукционных преобразователей перемещения. Также были проведены эксперименты, моделирующие трещину, заполненную пропантом. В этом случае апертура трещины изменялась в зависимости от приложенного вертикального давления на образец. По результатам экспериментов, проведённых в различных условиях, были построены зависимости амплитуды ультразвуковой волны, прошедшей через трещину. Экспериментально установлено, что поглощение звука в трещине гидроразрыва, обладающей естественной шероховатостью, вдвое ниже, чем в зазоре между прецизионными стеклянными пластинами. Полученные результаты позволят оценить величину раскрытия трещины гидроразрыва в лабораторных экспериментах, проводимых на образцах большего размера с использованием активного акустического мониторинга.

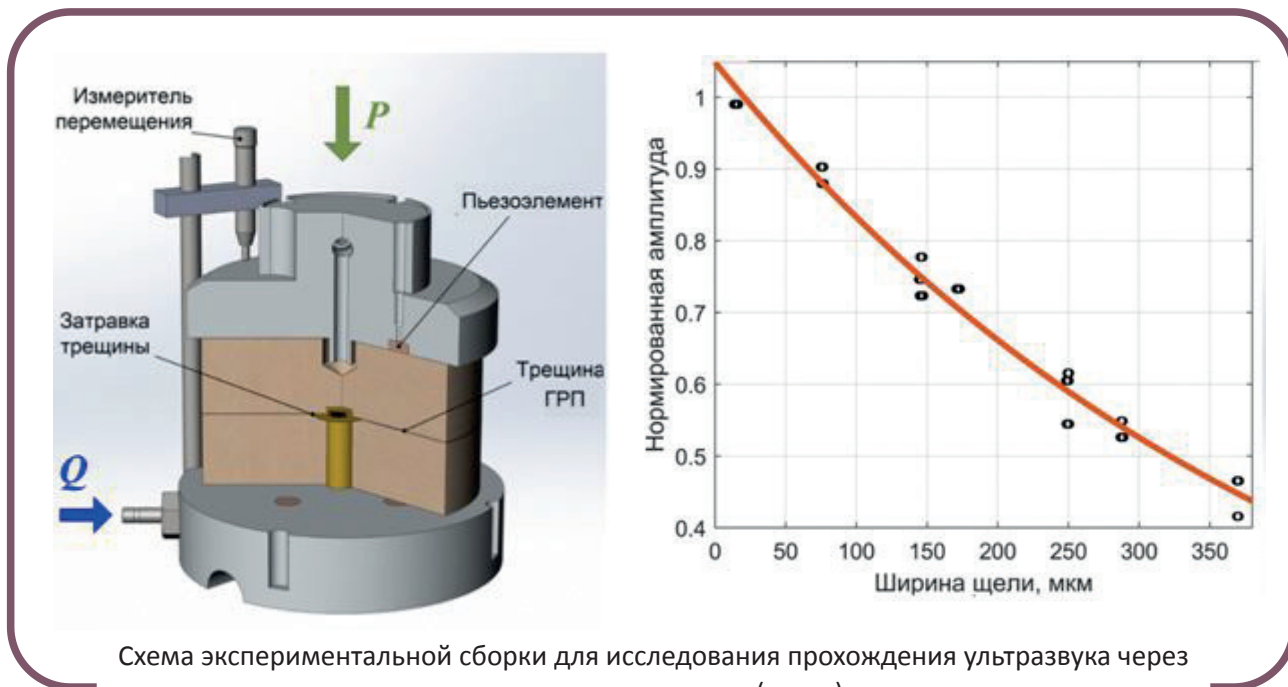


Схема экспериментальной сборки для исследования прохождения ультразвука через трещину гидроразрыва (слева).

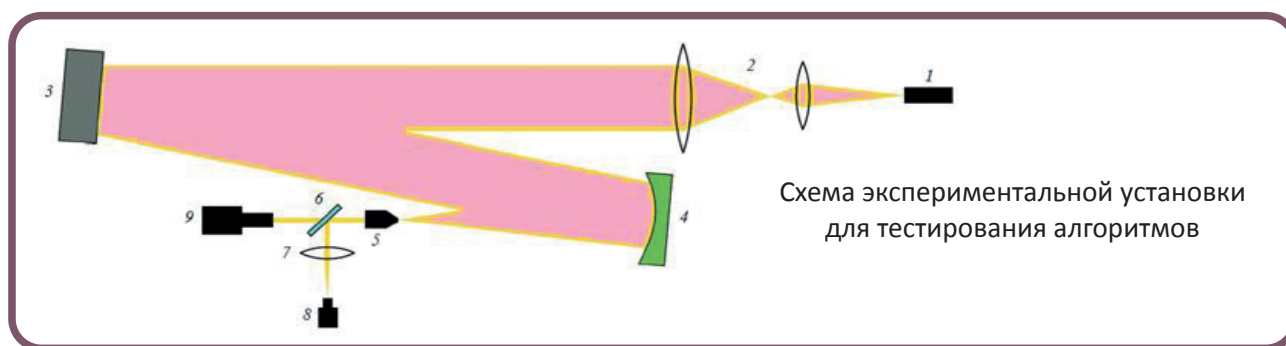
Зависимость амплитуды ультразвукового импульса, прошедшего через щель между стеклянными пластинами от её ширины (справа)

**Публикации:**

1. *Зенченко Е.В., Зенченко П.Е., Начев В.А., Турунтаев С.Б., Чумаков Т.К.* Совместный акустический и деформационный мониторинг трещины гидроразрыва в лабораторном эксперименте. Принята к публикации в журнал Физика Земли.

№ 20-69-46064 **Адаптивная оптика для коррекции волнового фронта в сверхмощных лазерных комплексах**  
(рук. проекта д.ф.-м.н. А. В. Кудряшов)

Цель проекта — разработка новых и модификация существующих компонентов адаптивной оптической системы для коррекции волнового фронта в петаваттных импульсных лазерах. Была собрана экспериментальная установка для исследования прототипа широкоапертурного деформируемого биморфного зеркала. Проведено исследование эффективности воспроизведения заданных aberrаций волнового фронта низших и высших порядков. Было показано, что зеркало способно воспроизводить центрально-симметричные полиномы Цернике №№ 3, 8, 15 и 24 (дефокусировка и сферические aberrации 4-го, 6-го и 8-го порядков) с амплитудой 20, 7.5, 4 и 2.9 микрон, соответственно (СКО = 5.8, 2.2, 0.7, 0.65 микрон). Проведено экспериментальное исследование разработанных алгоритмов оптимального управления системой по двум датчикам. Показано, что для случая динамических aberrаций со среднеквадратичным отклонением 30 нм в результате коррекции aberrаций число Штреля  $S$  составило  $S < 0.2$ ,  $S = 0.55$  и  $S = 0.86$ , соответственно. Для случая менее сильных динамических aberrаций ( $rms = 15$  нм) число Штреля  $S$  составило  $S = 0.3$ ,  $S = 0.7$  и  $S = 0.86$ , соответственно.



**Публикации:**

1. Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A. Focusing of a Laser Beam Passed through a Moderately Scattering Medium Using Phase-Only Spatial Light Modulator // Photonics. 2022. 9(5), p. 296. <https://doi.org/10.3390/photonics9050296>
2. Samarkin V.V., Alexandrov A.G., Galaktionov I.V., Kudryashov A.V., Nikitin A.N., Rukosuev A.L., Toporovsky V.V., Sheldakova Yu.V. Large-aperture adaptive optical system for correcting wavefront distortions of a petawatt Ti:sapphire laser beam // Quantum Electronics. 2022. 52(2), pp. 187–194. <https://doi.org/10.3390/10.1070/QE L 17989>
4. Samarkin V., Alexandrov A., Galaktionov I., Kudryashov A., Nikitin A., Rukosuev A., Toporovsky V., Sheldakova J. Wide-Aperture Bimorph Deformable Mirror for Beam Focusing in 4.2 PW Ti:Sa Laser // Appl. Sci. 12, 1144, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12031144>

№ 20-19-00597 **Адаптивная оптика для 6-ти метрового телескопа САО РАН**  
(рук. проекта к.ф.-м.н. Ю. В. Шелдакова)

Основная научно-техническая задача, решаемая в данном проекте, заключается в повышении эффективности спектроскопии звёзд за счёт применения современных разработок в области адаптивной оптики на 6-метровом телескопе наземного базирования БТА.

В рамках выполнения проекта (третий год) были проделаны следующие работы:

1. Разработаны контроллер блока управления адаптивным зеркалом на базе ПЛИС а также протокол обмена данными между ПЛИС и программным обеспечением верхнего уровня. Оптимизация профиля деформируемого зеркала осуществляется путем подбора напряжений на его актюаторах с помощью гибридного алгоритма: генетический алгоритм используется для определения начального приближения, а затем осуществляется переход к традиционному алгоритму «восхождения на холм». В качестве сигнала обратной связи используется изображение пучка в дальней зоне.

2. При аппроксимации фазового экрана полиномами Цернике вычисленное распределение фазы визуально похоже на заданное, а ошибки аппроксимации зависят от радиуса Фрида и изменяются в пределах от 21% до 24%. Отклонения амплитудного распределения пучка с заданной фазой от пучка с вычисленной фазой также зависят от радиуса Фрида и изменяются в более широком диапазоне – от 30% до 68%. Особые точки волнового фронта появляются при задании фазы экраном, моделирующим турбулентность, при этом число оптических вихрей зависит от интенсивности турбулентных искажений, внутреннего масштаба турбулентности, размеров области регистрации и пройденного пучком расстояния.



.Распределение амплитуды излучения.  
Лабораторный (слева) и численный (справа)  
эксперименты

3. В задаче регистрации спектров с высоким и сверхвысоким разрешением оценена возможность использования интерферометра Фабри-Перо в сочетании с дифракционным спектрографом скрещенной дисперсии. Основной узел интерференционно-дифракционного спектрографа разработан, изготовлен и испытан на макете с интерферометром Фабри-Перо с открытым входом.

4. Для тестирования макета системы адаптивной оптики было последовательно построено три контура: контур, отвечающий за стабилизацию положения лазерного излучения, контур для компенсации крупномасштабных aberrаций, включающий биморфное деформируемое зеркало и контур для компенсации мелкомасштабных aberrаций, включающий деформируемое зеркало на толкателях. Эффективность работы системы была протестирована с использованием тепловентилятора. Анализ спектральной энергии aberrаций волнового фронта, разложенного по полиномам Цернике, показывает более чем десятикратное улучшение при проведении коррекции.

#### Публикации:

1. Klochkova V., Sheldakova J., Galaktionov I., Nikitin A., Kudryashov A., Belousov V., Rukosuev A. Local correction of the light position implemented on an FPGA platform for 6-meter telescope // Photonics, 2022., 9(5), 322. <https://doi.org/10.3390/photonics9050322>

#### № 19-19-00706 Разработка новых корректоров волнового фронта с высоким пространственным разрешением управляющих элементов (рук. проекта к.т.н. В. В. Самаркин)

1. Выполнено проектирование биморфного корректора волнового фронта (КВФ) на 3Д принтере. Для изготовления была использована зеркальная подложка диаметром 30 мм с 18 управляющими электродами. КВФ был изготовлен на 3Д принтере QIDI Tech X-Max с FDM технологией пластикового корпуса печати материалом PLA. На рабочем столе камеры 3Д принтера при температуре 50° С производилось наращивание слоев PLA высотой 0.12 мм и шириной линий 0.3 мм. Поверхность подложки, оправленной в пластиковом корпусе, подвергалась полировке до оптического качества и нанесению отражающего покрытия. Исследование КВФ показало плоскостность поверхности 0.2 мкм PV и 0.04 мкм RMS. Показано, что данный корректор воспроизводит с достаточно высокой точностью aberrации, представляемые первыми 12 полиномами Цернике. Использование 3Д печати позволило уменьшить вес и размеры КВФ, обеспечить электрическую безопасность. Полировка корректора, встроенного в корпусе,

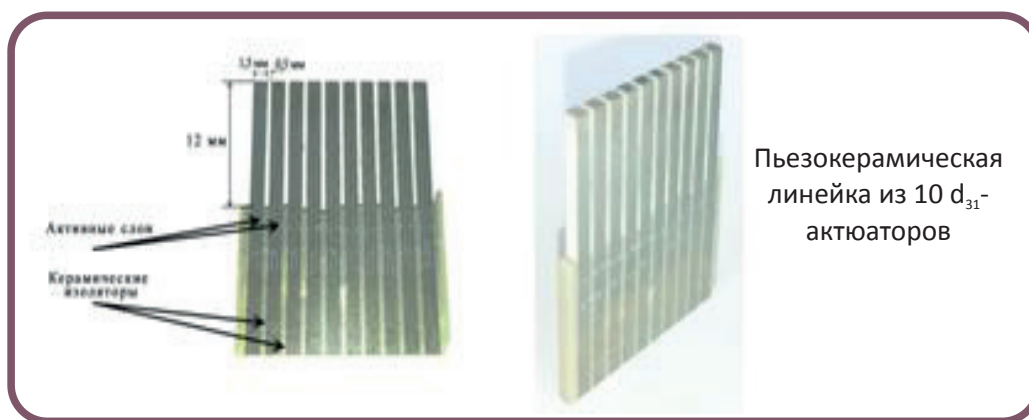
32 исключает aberrации поверхности, возникающие при креплении.



Фотографии 30 мм КВФ, изготовленных на 3Д принтере

2. Изготовлен биморфный КВФ с 37 управляющими электродами на пьезокерамическом диске с никелевым покрытием диаметром 30 мм. Сетка электродов была сформирована методом лазерной абляции. Электродная коммутация была выполнена медными проводами диаметром 80 мкм, которые были приварены к никелевой поверхности методом микроконтактной сварки расщепленным электродом. Толщина зеркальной подложки корректора составляла 1.6 мм (0.2 мм – пьезопластина; 1.4 мм – подложка зеркала). Плоскостность поверхности составила 0.3 мкм (PV) и 0.07 мкм (RMS). Корректор позволил воспроизводить aberrации ВФ до седьмого порядка. Частота первого резонанса составила 12.5 кГц.

3 Разработаны линейки пьезокерамических актюаторов для блочной матрицы 10x10 на принципе поперечного пьезоэффекта ( $d_{31}$ -актюаторы). Сечение актюатора составило 1.5x1.5 (3 слоя по 0.5 мм), а длина рабочей части – 12 мм. Были изготовлены линейки, состоящие из 10 независимых актюаторов, с общим отрицательным выводом. При положительном напряжении +300 В получено перемещение - 4 мкм, а при отрицательном -300 В перемещение составило +10 мкм. Этот результат превосходит полученные ранее результаты для  $d_{33}$ -актюаторов (до +6 мкм). Кроме того, следует отметить, что площадь сечения  $d_{31}$ -актюаторов составила 1.5x1.5 мм<sup>2</sup>, что в 2.2 раза меньше, чем ранее достигнутая площадь для  $d_{33}$ -актюаторов. Уменьшение сечения отдельного актюатора позволит увеличить плотность упаковки актюаторов.



**Публикации:**

1. Toporovsky V. et al. State-of-the-Art Technologies in Piezoelectric Deformable Mirror Design // Photonics. 2022. 9(5), 321. [Doi: 10.3390/photonics90503212](https://doi.org/10.3390/photonics90503212).
2. Toporovsky Vladimir et al. Evaluation of bimorph deformable mirror performance through Zernike polynomials reconstruction. Proc. SPIE 12218, pp. 1221807, 2022. [Doi: 10.1117/12.2632915](https://doi.org/10.1117/12.2632915).



№ 22-27-20066 **Локальные вариации скоростных характеристик участков земной коры центральной части Байкальского рифта по данным долговременных наблюдений сейсмической сети на основе метода кросс-корреляции микросейсмического шума.**

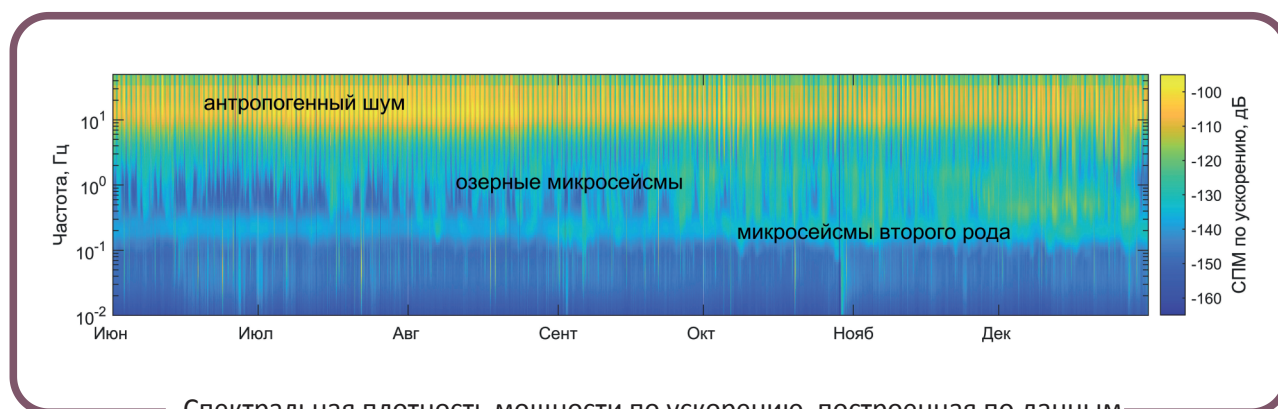
**Связь с сейсмичностью региона**

(рук. проекта к.г.-м.н. *Ц. А. Тубанов* (региональный конкурс, республика Бурятия).

**Исполнители:** к.г.-м.н. *П. А. Предеин* (ГИН СО РАН),

кандидаты физ.-мат. наук *А. Н. Беседина, Г. Н. Иванченко* (ИДГ РАН)

На основе вероятностного подхода проведено исследование микросейсмического фона для Прибайкалья. На сейсмических станциях вблизи оз. Байкал обнаружены колебания с характерными частотами около 1 Гц, которые проявляются с мая по декабрь. Анализ отмеченных вариаций позволил идентифицировать их как озерные микросейсмы. На рисунке показаны разные диапазоны, характеризующие структуру микросейсм: хорошо видна полоса частот выше 10 Гц, характерная для антропогенных шумов; диапазон частот 0.5–2 Гц соответствует озерным микросейсам, которые проявляются в виде дискретно появляющихся областей повышенной интенсивности спектральной плотности мощности; пик вторичных микросейсм выражен в полосе частот в районе 0.2–0.3 Гц.



Спектральная плотность мощности по ускорению, построенная по данным станции «Максимиха» (МХМВ, z – компонента, 700 м от береговой линии о. Байкал) за 2020 г.

**Публикации:**

1. *Беседина А.Н., Тубанов Ц.А.* Микросейсмы как инструмент геофизических исследований. Состояние вопроса. Принята к публикации в журнал *Вулканология и сейсмология*.

№ 22-67-00025 **Натурные исследования, экспериментальное и математическое моделирование газодинамических процессов в системе донные отложения-водная толща на арктическом шельфе России**

(рук. проекта д.ф.-м.н. *Н. У. Шахова*)

Одной из фундаментальных проблем геокриологии и климатологии – в контексте выявления климатических последствий деградации подводной мерзлоты и дестабилизации арктических шельфовых гидратов, является вопрос о роли миграции морской соли (солевого эффекта) в деградации подводной мерзлоты.

Ранее авторской группой было обнаружено, что средние скорости вертикальной деградации подводной мерзлоты на мелководном арктическом шельфе составляют примерно 14 см в год, что значительно выше скоростей, рассчитанных на основе математического моделирования, в котором основную роль играет термодиффузия (работы Н. Романовского, В. Соловьева, А. Гаврилова, и др.). Поэтому была высказана гипотеза о важной и недоучтенной роли солепереноса в арктической морской системе при-

В ходе выполнения данного проекта была отработана методика экспериментального моделирования процессов таяния порового льда и диссоциации порового гидрата в мерзлых гидратосодержащих породах при снижении давления, термических воздействиях и в условиях солепереноса. Экспериментальное моделирование влияния процессов солепереноса на диссоциацию поровых газовых гидратов при отрицательных температурах проводилось путем создания физического контакта исследуемых мерзлых гидратонасыщенных образцов с солевыми растворами при атмосферном давлении в герметичном теплоизолированном контейнере при постоянной отрицательной температуре. Таким образом, в рамках выполнения первого этапа данного проекта была отработана методика экспериментального моделирования процессов таяния порового льда и диссоциации порового гидрата в мерзлых гидратосодержащих породах при снижении давления, термических воздействиях и в условиях солепереноса. Моделирование природных процессов в донных отложениях арктических морей требует создания особых термобарических условий, характеризующихся низкими температурами и высоким давлением, как горным, так и поровым.

Для проведения экспериментального моделирования была адаптирована фильтрационная установка «Гидрат», разработанная авторами совместно с ООО «Экогеоспром». Данный аппаратный комплекс и разработанные схемы подготовки и проведения испытаний позволяют определять изменения проницаемости образцов при фазовых переходах поровой влаги вода-лед, вода-гидрат, лед-гидрат, гидрат-вода, гидрат-лед. Исследована газогидратная толща с подвижными блоками, зоны контактов которых зависят от гравитационных сил и меняются в результате тектонических и сейсмических нагрузок. Переход системы в новое состояние равновесия на участках, приблизившихся к предельному состоянию, происходит скачком и сопровождается выделением энергии. Изучено напряженно-деформированное состояние газогидратной гранулы. Показано, что на ее поверхности, при сжатии на контактах с другими зернами, возникает обширная область положительных объемных деформаций, облегчающих просачивание метана в окружающее пространство. Сформулировано условие бифуркации микрополярного континуума, моделирующего поведение осадочной толщи, как причина эмиссии метана из зон скопления запертого газа в мерзлых породах и метастабильных реликтовых газогидратов. Разработан механизм изменения напряженного состояния осадочной толщи и эмиссии метана из зон скопления запертого газа в мерзлых породах и метастабильных реликтовых газогидратов. Установлено, что при сжатии газогидратных зерен на их поверхности в ледяной корке возникает обширная область положительных объемных деформаций, приводящих к увеличению выделений метана. Сформулирована модель фильтрации метана в пористой среде, учитывающая возможность его внезапного выброса вместе с породой. Процесс фильтрации описывается уравнением Лейбензона. Данная модель была апробирована на лабораторных экспериментах по фильтрации газа в пористой среде, описанных выше. Сопоставление результатов показало, что и в численной модели, и в лабораторном эксперименте разрушение начинает происходить с поверхности материала. В то же время, критическое давление, задаваемое на границе области, при котором начинает происходить разрушение, отличается незначительно (0,1048, 0,1037 МПа). Время, за которое разрушение происходит во всей длине сред тоже сопоставимы (3 и 4 с). Важно отметить, что достаточно простая постановка задачи фильтрации газа и выбор критерия разрушения продемонстрировала как реальность с физической точки зрения предложенного механизма образования выбросов газа (метана) и породы при увеличении потока газа на некоторой глубине в результате разложения метановых гидратов, так и появление неустойчивости в экспериментах, моделирующих данный процесс. Проведено обобщение математической модели деградации углеводородосодержащего мерзлого пласта с аномально низкой проницаемостью. Обобщение опирается на развитое и разработанное в рамках данного проекта представление о физическом механизме краевого разрушения (разложения) агломерата газогидрат-лед-газ, что приводит к необходимости введения порога падения внешнего давления, и к возможности количественной оценки критического давления, связанного с прочностью корки льда, позволяющего газогидрату находиться в самоконсервированном виде. Результаты исследований показали, что скрытое давление газа существенным образом может увеличить поток свободного газа и замедлить движение фронта деградации пласта, насыщенного газогидратом и льдом. Сравнение полученных данных о скорости движения

выброса метана вполне согласуются с результатами имеющихся натуральных и лабораторных экспериментов. Это направление исследований является крайне перспективным для понимания механизма восходящего движения газового (метанового) фронта, которое согласно натурным данным, полученным ранее в море Лаптевых, достигает 7–8 метров в год. При достижении газовым фронтом поверхности осадка, происходит массивный выброс пузырькового метана в водную толщу-атмосферу.

Предложенная модель и полученные результаты могут быть использованы для лучшего понимания процессов и для оценки темпов деградации вечной мерзлоты и темпов выбросов метана из областей, где газогидраты находятся в метастабильном самоконсервированном состоянии, что имеет очень важное значение, поскольку метан — мощный парниковый газ, способствующий ускорению процесса глобального потепления и связанных с этим экологических проблемам. Разработан и изготовлен экспериментальный стенд, предназначенный для оценки количественного вклада пузырькового транспорта в вертикальный перенос метана, уточнения методов количественной оценки потока метана и оценки скорости апвеллинга (подъема) вод, вызванного всплывающими пузырьками в зависимости от их размера и потока. В результате проведенных тестовых экспериментов было показано, что различной интенсивности апвеллинг наблюдался, как при испускании одиночных пузырьков, поперечные размеры которого характерны для природных пузырьков (от 1 до 15 мм в диаметре), формирующих газовые факелы (струи) в арктических морях, так и при непрерывном потоке пузырьков. В октябре-ноябре 2022 г. были выполнены комплексные натурные исследования в Карском море и в Печорском море, которые позволили выявить первые представительные районы для тестирования экспериментальных и теоретических исследований, которые выполняются в рамках данного проекта. Наиболее привлекательными представляются районы с пингообразными (конусообразными) структурами, обнаруженными на дне исследуемых морей.

Результаты комплексных исследований, выполняемых в рамках данного проекта важны не только для потенциальной оценки климатических последствий разгрузки пузырькового метана в арктической системе донные осадки-водная толща, но и для оценки геоинженерных рисков в перспективных районах освоения арктического шельфа России.

#### **Публикации:**

1. *Chuvilin E, Davletshina D, Bukhanov B, Mukhametdinova A, Istomin V.* Formation of Metastability of Pore Gas Hydrates in Frozen Sediments: Experimental Evidence // *Geosciences*. 2022. 12(11):419. <https://doi.org/10.3390/geosciences12110419>
2. *Lobkovsky L.I., Ramazanov M.M., Semiletov I.P., Alekseev D.A.* Mathematical Model of the Decomposition of Unstable Gas Hydrate Accumulations in the Cryolithozone // *Geosciences*. 2022. 12(9):345. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090345>
3. *Shpak P.M., Turuntaev S.B., Trimonova M.A., Tairova A.A., Belyakov G.V., Iudochkin N.A.* The Model of Cohesionless Sediment Blowout with an Increase in the Methane Flow Rate // *Geosciences*. 2022. 12(11):423. <https://doi.org/10.3390/geosciences12110423>

## **РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**№ 19-05-50050 Пылегазовое загрязнение среды обитания и связанные с ним вариации геофизических полей**

(рук. проекта академик РАН В. В. Адушкин)

На основе данных о пылевыделении при различных технологических операциях, применяемых в ходе добычи полезных ископаемых и общего объема разработанной горной массы, получены оценки выбросов микрочастиц в атмосферу при разработке угольных и железорудных карьеров как в РФ, так и в мире.

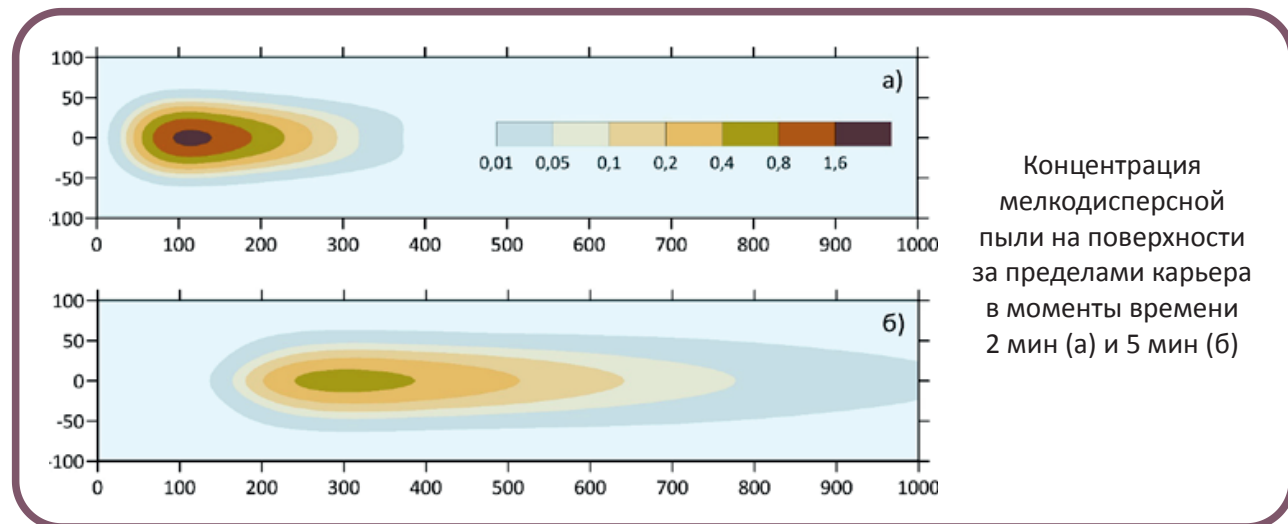


Показано, что открытые горные работы являются значимым источником техногенных выбросов микро-частиц в атмосферу, общие оценки выбросов от этого источника превосходят оценки выбросов от всех видов используемого транспорта.

Проведены комплексные инструментальные наблюдения за развитием пылегазовых облаков промышленных взрывов на Лебединском карьере, одном из наиболее крупных железорудных карьеров Курской магнитной аномалии, и Ситовском известковом карьере. В рамках проекта впервые представлен опыт использования компактных лазерных датчиков для исследований на открытых горных карьерах. Разработанная на основе аппаратной платформы Arduino Uno и лазерного датчика микрочастиц Sensirion SPS30 система, с автономным питанием от источника 12 В, позволила в реальном времени наблюдать изменения концентрации микрочастиц в полевых условиях.

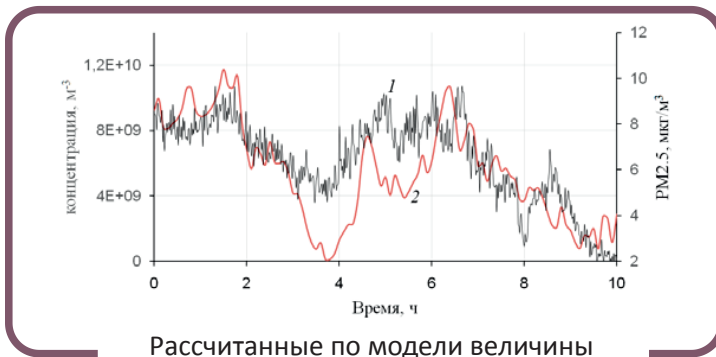
Результаты инструментальных наблюдений на карьерах предполагается использовать для верификации, разработанной в рамках проекта, новой оригинальной физико-математической модели развития пылегазового облака промышленного взрыва. Данная модель в отличие от других описывает все стадии процесса: от выделения энергии в продуктах детонации до подъема пылегазового облака. Модель позволяет оценить количественные характеристики пылегазового облака (массу частиц разного размера и их распределения по пространству в разные моменты времени), которые невозможно или очень трудно определить экспериментально, и они не рассчитываются в других моделях.

Результаты 3D расчетов распространения в поле ветра облака мелкодисперсной пыли, сформированного в результате подрыва 7 зарядов, расположенных в карьере ниже уровня дневной поверхности на 250 м, показали, что размеры следа пыли у поверхности существенно меняются в направлении ветра, а в поперечном направлении, увеличившись на начальной стадии примерно в два раза, в последующем – почти не меняются. Показано, что максимальная концентрация мелкодисперсных частиц вблизи поверхности превышает предельно допустимые разовые концентрации взвешенных частиц в атмосферном воздухе на расстояниях, не превышающих 0.5–1 км от борта карьера.



Разработана оригинальная теоретико-численная модель, позволяющая получать оценки концентрации аэрозольных частиц в мегаполисе на основе взаимосвязи параметров атмосферного электрического поля и концентрации микрочастиц. В модели используются данные синхронных натуральных наблюдений за концентрацией твердых частиц в атмосфере и напряженностью электрического поля в г. Москве (Центр геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН) и Геофизической обсерватории «Михнево» ИДГ РАН, расположенной вне зоны влияния мегаполиса.

Показана возможность использования этой модели для оценки концентраций аэрозольных частиц с произвольным известным высотным профилем. Проведена верификация модели путем сравнения рассчитанных величин концентраций микрочастиц и измеренных вариаций концентрации PM2.5.



Рассчитанные по модели величины концентрации мелкодисперсных частиц диапазона и вариации измеренных концентраций PM2.5.

1 – расчет по модели, 2 – измеренные

**Публикации:**

1. *Khazins V.M., Solov'ev S.P., Loktev D.N., Krashennnikov A.V., Shuvalov V.V.* Nearsurface Air Layer Pollution with Micronic Dust Particles in Large-Scale Blasting in Open Pit Mining // *Journal of Mining Science*. 2022. Vol. 58. No. 4. pp. 676–689.

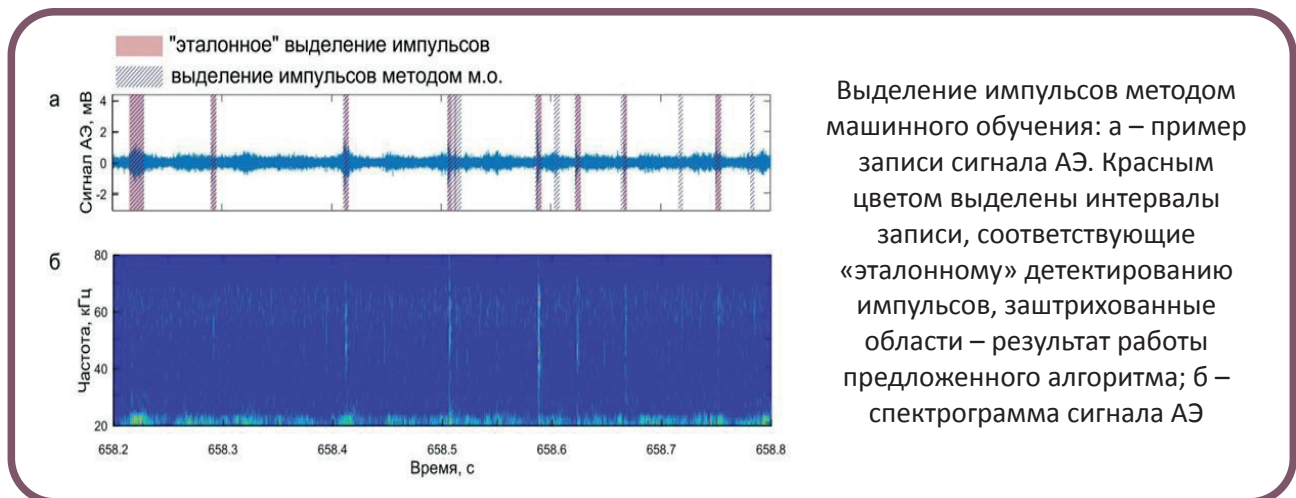
2. *Krashennnikov, A.V., Loktev, D.N., Soloviev, S.P., Spivak A.A.* Compact Laser Devices for Measuring Airborne Microparticle Concentrations and Their Application at the Geophysical Monitoring Center of the Sadovsky Institute of Dynamics of Geospheres, Russian Academy of Sciences // *Seism. Instr.* **58**, 235–243. 2022.

3. *Рыбнов Ю.С., Крашенинников А.В., Соловьев С.П., Рыбнов С.Ю.* Мониторинг пылегазовых облаков при проведении массовых взрывов на Лебединском карьере // *Рациональное освоение недр*. 2022. №1 (63). С. 58–61.

**№ 20-35-90074 Деформирование разломов с гетерогенной структурой интерфейса**

(рук. проекта к.ф.-м.н. А. А. Остапчук)

Проект направлен на выявление новых признаков перехода локальных областей активных разломов в метастабильное состояние и исследование закономерностей инициирования распространения разрыва на разломе с гетерогенной структурой. В рамках второго этапа реализации проекта разработан метод выделения импульсов акустической эмиссии (АЭ), сопровождающей сдвиговое деформирование модельного разлома, с помощью алгоритмов машинного обучения. При обучении алгоритма использовались статистические параметры АЭ, а также параметры, учитывающие спектральные особенности сигнала. Эффективность предложенного метода оценивалась относительно уже известного порогового метода выделения импульсов и продемонстрирован существенный рост качества детектирования импульсов.



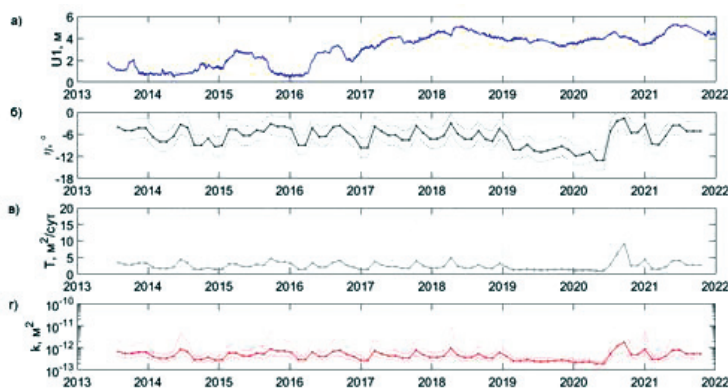
Выделение импульсов методом машинного обучения: а – пример записи сигнала АЭ. Красным цветом выделены интервалы записи, соответствующие «эталонному» детектированию импульсов, заштрихованные области – результат работы предложенного алгоритма; б – спектрограмма сигнала АЭ

### Публикации:

1. Морозова К.Г., Остапчук А.А. Связь состояния сдвиговой трещины в гранулированном материале и акустоэмиссионных и деформационных данных // Акустический журнал, 2022, том 68, № 5, с. 543–549.

### № 20-35-90016 **Динамическое деформирование флюидонасыщенных коллекторов при сейсмическом воздействии** (рук. д.г.-м.н. Э. М. Горбунова)

Выполнена дистанционная оценка фильтрационных свойств флюидонасыщенных коллекторов на основе анализа фазового сдвига полусуточной приливной волны лунного типа  $M_2$ , рассчитанной в смещении грунта и выделенной в вариациях уровня разновозрастных водоносных горизонтов и определены диапазоны вариаций порового давления в системе пласт «скважина» при сейсмическом воздействии.



Диаграммы вариаций уровня напорного водоносного горизонта (а), фазового сдвига (б), водопроницаемости (в) и проницаемости (г) по данным мониторинга УНУ СКГН «Михнево». Пунктиром обозначены доверительные интервалы рассчитанных параметров

### Публикации:

1. Gorbunova E.M., Batukhtin I.V., Besedina A.N., Petukhova S.M. Hydrogeological Responses of Fluid Saturated Collectors to Remote Earthquakes // Processes in GeoMedia. 2022. Volume IV. Switzerland: Springer Geology. ISBN 9783030763275.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-76328-2\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76328-2_22)

## ХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ДОГОВОРЫ

- № МГ–222190 **Мониторинг и обеспечение сейсмической и акустической безопасности массовых взрывов в карьере АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева».** (Заказчик АО «Михайловский ГОК», отв. к.ф.-м.н. В. И. Куликов).
- № 15/2022 **Исследования сейсмического действия массовых взрывов на застройку города Губкин** (заказчик АО КМАруда, отв. к.ф.-м.н. В. И. Куликов).

3. № 16/2022 **Исследования детонационных процессов во взрывчатых веществах** (заказчик АО КМАруда, отв. к.ф.-м.н. *В. И. Куликов*).
4. № ЛГ–212497 **Услуги по измерению сейсмического и акустического воздействий массовых взрывов на застройку городов Губкин и Старый Оскол, а также на опасные производственные объекты АО «Лебединский ГОК»** (заказчик АО «Лебединский ГОК», отв. к.ф.-м.н. *В. И. Куликов*).
5. № ЛГ–220043 **Мониторинг и обеспечение сейсмической и акустической безопасности массовых взрывов в карьере АО «Лебединский ГОК»** (заказчик АО «Лебединский ГОК», отв. к.ф.-м.н. *В. И. Куликов*).
6. № 0201-22-00001067 **Исследование сейсмического и акустического действия массовых взрывов на участке Южный 2 СП «Угольный разрез «Юньягинский»** (заказчик АО «Воркутауголь», отв. к.ф.-м.н. *В. И. Куликов*).
7. № 0321Э **Экспертиза отчета о сейсмической обстановке севера о. Сахалин** (заказчик ООО Геофизтех, отв. к.ф.-м.н. *Д. Н. Локтев*).
8. № 0322Э **Экспертиза отчета о сейсмической обстановке севера о. Сахалин** (заказчик ООО Геофизтех, отв. к.ф.-м.н. *Д. Н. Локтев*).
9. № 96-2022/149 **ШТРИХ ИДГ** (заказчик РФЯЦ ВНИИЭФ ФГУП, отв. к.т.н. *А. Н. Ляхов*).
10. № 8730-2022. **Испытания экспериментальной модели быстродействующего датчика волнового фронта и изготовление блока усилителей адаптивной оптической системы** (заказчик РФЯЦ ВНИИЭФ ФГУП, отв. к.ф.-м.н. *А. Л. Рукосуев*).

## Интеграция науки и образования

*Одним из приоритетных направлений деятельности ИДГ РАН имени академика М. А. Садовского является подготовка высококвалифицированных кадров и привлечение талантливой молодежи в сферу науки*

**БАЗОВАЯ КАФЕДРА «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА ГЕОСИСТЕМ» Московского физико-технического института (национальный исследовательский университет)**

В 1963 г. по инициативе академиков *М. А. Лаврентьева* и *М. А. Садовского* была создана базовая кафедра МФТИ – **Физика взрыва**. Известный геомеханик, профессор, д.ф.-м.н. *В. Н. Родионов* стал

первым заведующим кафедры. В 2011 г. кафедра была переименована и стала называться – **Теоретическая и экспериментальная физика геосистем**. Возглавляет кафедру директор ИДГ РАН, д.ф.-м.н. *С. Б. Турунтаев*. Кафедра готовит специалистов по фундаментальной и прикладной геофизике процессов, протекающих в Земле, на её поверхности, в атмосфере и ближнем космосе. Кафедра выпускает магистров по направлению «**03.04.01** –

**Прикладные математика и физика»,** а также аспирантов по направлению «**05.06.01 – Науки о Земле**».

Курсы лекций, семинарских и практических занятий охватывают весь спектр геофизики. На кафедре преподают ведущие ученые, профессора и доценты Института, включая 5 докторов и 9 кандидатов наук. Среди компетенций, формирующихся у студентов в процессе обучения на кафедре, можно отметить: i) физика верхних и нижних геосфер; ii) получение, хранение и анализ данных; iii) компьютерное моделирование геофизических процессов; iv) работа в команде.

В 2022/2023 учебном году на кафедре обучается 13 студентов и 6 аспирантов. Студенты кафедры принимают активное участие в текущей научно-исследовательской работе Института, участвуют во всероссийских и международных научных конференциях.

#### **АСПИРАНТУРА**

В соответствии с Федеральным законом РФ «О высшем образовании в Российской Федерации» от 23 декабря 2012 года № 273-ФЗ в 2021/22 учебном году в аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН) по специальности **25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых** и **25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы** обучалось 11 аспирантов.

В 2022 году успешно защитили научно-квалификационные работы и получили дипломы об окончании аспирантуры аспиранты ИДГ РАН:

- ▲ *Ксения Георгиевна МОРОЗОВА* (научн. рук. к.ф.-м.н. А. А. Остапчук, лаборатория «Деформационные процессы в земной коре»). Тема – **Закономерности излучения сейсмоакустических импульсов при развитии динамических подвижек по разломам и трещинам** (профиль 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых).
- ▲ *София Максимовна ПЕТУХОВА* (научн. рук. д.ф.-м.н. Э. М. Горбунова, лаборатория «Деформационные процессы в земной коре»). Тема – **Динамика деформирования флюидонасыщенного коллектора при сейсмическом воздействии** (профиль 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых).

С 1 марта 2022 года в соответствии с частью 3 статьи 72 Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации» вступило в силу Положение о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре). С 2022 года аспирантура ИДГ РАН проводит набор лиц, имеющих высшее образование, по новым номенклатурам научных специальностей: **1.6.9. – Геофизика, 1.6.18. – Науки об атмосфере и климате.**

## **Совет молодых ученых**

*Одна из основных задач Совета молодых ученых (СМУ) – повышение квалификации, содействие в развитии творческого и научного потенциала молодых научных сотрудников Института, аспирантов, обеспечение преемственности в сфере отечественной науки и высшего образования*

Молодые ученые участвуют в исследованиях всех научных направлений Института: из 9 НИР, осуществляющихся в рамках выполнения государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ, четверть руководят молодые ученые. Научные работы молодых ученых поддерживаются



грантами РФФИ – 4, РФФИ – 2. Более половины публикаций (включенных в международные системы цитирования Web of Science, Scopus, РИНЦ, Google Scholar и др.), от общего числа изданных работ научными сотрудниками Института в 2022 г., подготовлены молодыми исследователями.

Руководство ИДГ РАН поддерживает участие молодых ученых в российских и международных научных школах и конференциях



Научный и кадровый потенциал в лице молодых ученых ИДГ РАН, при непосредственном участии которых была организована работа VI Международной конференции «ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГЕОСИСТЕМАХ» (21-24 июня 2022 г. Москва)



Академик РАН, научн. рук. ИСЗФ СО РАН Г. А. Жеребцов поздравляет к.ф.-м.н. С. З. Беккер, завоевавшей третье место среди докладов на XVII конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»



II Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике» (Московская область, д. Курово). Слева-направо: к.ф.-м.н. председатель СМУ И. А. Ряховский, к.ф.-м.н. А. Н. Беседина, м.н.с. К. Г. Морозова, м.н.с. С. М. Петухова



В свободное от «науки» время есть чем заняться, например, провести турнир по настольному теннису

# Патентно-лицензионная деятельность



1. № 2022622887 от 16.11. 2022 г. **Каталог локальных синхронных вариаций массовой и количественной концентраций дисперсных микрочастиц и метеопараметров атмосферы, зарегистрированных геофизической обсерваторией ИДГ РАН «Михнево» в 2021 г. (БД)**

**Авторы:** к.ф.-м.н. Д. Н. Локтев, д.ф.-м.н. С. П. Соловьев, м.н.с. А. В Крашенинников

2. № 2022623106 от 25.11.2022 г. **База данных наземных измерений амплитудно-фазовых характеристик сигналов СДВ диапазона, принятых в ГФО «Михнево» в 2021 году**

**Авторы:** д.ф.-м.н. Б. Г. Гаврилов, к. ф.-м.н. Ю. В. Поклад, к.ф.-м.н. И. А. Ряховский, с.н.с. В. М. Ермак, аспирант Н. С. Ачкасов, м.н.с. Е. Н. Козакова

3. № 2022623460 от 15.12.2022 г. **Мониторинг сейсмических событий Центральной части Восточно-Европейской платформы по данным малоапертурной группы «Михнево» в 2020 году (БД)**

**Авторы:** д.ф.-м.н. И. А. Санина, с.н.с. С. Г. Волосов, м.н.с. Т. В. Данилова, н.с. Н. Л. Константиновская, м.н.с. С. А. Тарасов

4. № 2022623478 от 15.12.2022 г. **Каталог промышленных взрывов зарегистрированных геофизической обсерваторией ИДГ РАН «Михнево» в 2021 году (БД)**

**Авторы:** д.ф.-м.н. И. А. Санина, с.н.с. С. Г. Волосов, м.н.с. Т. В. Данилова, н.с. Н. Л. Константиновская, м.н.с. С. А. Тарасов

5. № 2022623601 от 22.12.2022 г. **Мониторинг сейсмических событий Центральной части Восточно-Европейской платформы по данным малоапертурной группы «Михнево» в 2021 году (БД)**

**Авторы:** д.ф.-м.н. И. А. Санина, с.н.с. С. Г. Волосов, м.н.с. Т. В. Данилова, н.с. Н. Л. Константиновская, м.н.с. С. А. Тарасов

6. № 2022623644 от 23.12.2022 г. **Каталог промышленных взрывов зарегистрированных геофизической обсерваторией ИДГ РАН «Михнево» в 2020 году (БД)**

**Авторы:** д.ф.-м.н. И. А. Санина, с.н.с. С. Г. Волосов, м.н.с. Т. В. Данилова, н.с. Н. Л. Константиновская, м.н.с. С. А. Тарасов

### ПУБЛИКАЦИИ В ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЯХ

1. *Adushkin V.V., Rybnov Yu.S., Spivak A.A. Wave-related, electrical, and magnetic effects due to the January 15, 2022 catastrophic eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'aapai volcano* // Journal of Volcanology and Seismology. 2022. Vol. 2. No. 4. P. 251–263. DOI: [10.1134/S0742046322040029](https://doi.org/10.1134/S0742046322040029).
2. *Adushkin V.V., Rybnov Y.S., Spivak A.A. Geophysical Effects of the Eruption of Hunga-Tonga-Hunga-Ha'apai Volcano on January 15, 2022* // Doklady Earth Sciences, 2022, vol. 504, No. 2, p. 362–367. DOI: [10.1134/S1028334X22060034](https://doi.org/10.1134/S1028334X22060034).
3. *Adushkin V.V., Kuz'micheva M.Y., Spivak A.A. Disturbance of the Geomagnetic Field during Earthquakes* // Dokl. Earth Sc. 2022. № 506, p. 813–817. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22700337>
4. *Adushkin Vitaly V., Riabova Svetlana A., Romanovsky Yaroslav O., Rybnov Yury S., Spivak Alexander A., and Kharlamov Vladimir A. Geophysical effects caused by the explosive eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Haapai volcano on January 15, 2022.* (2022). Proc. SPIE 12341: 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1234157 (7 December 2022). <https://doi.org/10.1117/12.2643268>
5. *Adushkin V.V., Lovchikov A.V. & Goev A.G. The Occurrence of a Catastrophic Rockburst at the Umbozero Mine in the Lovozero Massif, Central Part of the Kola Peninsula* // Dokl. Earth Sc. 2022. № 504, p. 305–309. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22050038>
6. *Afanasyev V.N., Pechernikova G.V. On the Probability of Capturing Preplanetary Bodies into the Protolunar Swarm During the Formation of the Earth–Moon System* // Solar System Research, 2022, Vol. 56, No. 6, P. 382–402. <https://doi.org/10.1134/S0038094622060016>.
7. *Baryshnikov N.A., Zenchenko E.V., & Turuntayev S.B. Dependence of effective permeability on pore pressure gradient at low flow rates in low-permeability limestone. Interpretation.* В печати.
8. *Bayanova T.B., Bazay A.V., Steshenko E.N., Kunakkuzin E.L., Serov P.A., Borisenko E.S., Elizarov D.V. Mesoarchaeon banded iron formations of the Fennoscandian Shield: new zirconU-Pb (ID-TIMS and SHRIMP-II) isotope ages of noble metal mineralization and Nd-Sr data on whole rocks* // International Geology Review. 2022. DOI: [10.1080/00206814.2022.2153386](https://doi.org/10.1080/00206814.2022.2153386).
9. *Bekker S.Z. Verification of plasma chemical models of the ionospheric d region of the according to radiophysical data from «Mikhnevo» geophysical observatory* // Geomagnetism and aeronomy, 2022, vol. 62, No. 3, p. 237–245. DOI: [10.1134/S0016793222020025](https://doi.org/10.1134/S0016793222020025).
10. *Bekker S.Z., Lyakhov A.N. Study of the dynamics of the ions and electrons concentration in the lower ionosphere during x-ray flares.* (2022). Proc. SPIE 12341: 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1234174 (7 December 2022). DOI: [10.1117/12.2644453](https://doi.org/10.1117/12.2644453).
11. *Besedina A.N., Kabychenko N.V., Volosov S.G. Method for Estimating the Self-Noise of the Measuring Channel on the Example of the SM-3KV Short-Period Seismometer* // Seismic instruments, 2022, vol. 58, No. 1, p. 1-10. DOI: [10.3103/S0747923922010030](https://doi.org/10.3103/S0747923922010030).
12. *Besedina A.N., Pavlov D.V., Sharafiev Z.Z. Triggering Landslides with Seismic Vibrations.* (2022). Springer Geology, pp. 327–334. DOI: [10.1007/978-3-030-76328-2\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76328-2_34).
13. *Budkov A.M., Kishkina S.B. & Kocharyan G.G. Modeling Supershear Rupture Propagation on a Fault with Heterogeneous Surface* // Izv., Phys. Solid Earth. 2022. № 58, p. 562–575. <https://doi.org/10.1134/S1069351322040012>
14. *Chuvilin E., Davletshina D., Bukhanov B., Mukhametdinova A., Istomin V. Formation of Metastability of Pore Gas Hydrates in Frozen Sediments: Experimental Evidence* // Geosciences. 2022, № 12, p. 419. <https://doi.org/10.3390/geosciences12110419>
15. *Filippova A.I., Solovey O.A. Surface Wave Tomography of the Kola Peninsula and Adjacent*



**Territories: Data on Dispersion of Group Velocities of Rayleigh and Love Waves** // Doklady Earth Sciences, 2022, vol. 504, No. 2, p. 380–384.

[DOI: 10.1134/S1028334X2206006X](https://doi.org/10.1134/S1028334X2206006X).

16. *Gavrilov B.G., Poklad, Yu. V., Ryakhovsky I.A., Ermak V.M.* **Dependence of D-Region Perturbations of the Midlatitude Ionosphere on the Spectral Composition of the X-Ray Radiation of Solar Flares According to Experimental Data** // Geomagnetism and Aeronomy, 2022, vol. 62, No. 2, p. 98–103.

[DOI: 10.1134/S0016793222020086](https://doi.org/10.1134/S0016793222020086).

17. *Gavrilov B.G., Poklad Yu.V., Ryakhovsky I.A., Ermak V.M., Achkasov N.S., Kozakova E.N.* **Global electromagnetic disturbances caused by the eruption of the Tonga volcano on January 15, 2022** // Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2022. [DOI: 10.1029/2022JD037411](https://doi.org/10.1029/2022JD037411).

18. *Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A.* **Focusing of a Laser Beam Passed through a Moderately Scattering Medium Using Phase-Only Spatial Light Modulator** // Photonics, 2022, vol. 9, No. 5, p. 296.

[DOI: 10.3390/photonics9050296](https://doi.org/10.3390/photonics9050296).

19. *Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., Kudryashov A.* Shack-Hartmann sensor with B-spline approximation technique. (2022). Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, №119870K. [DOI: 10.1117/12.2614658](https://doi.org/10.1117/12.2614658).

20. *Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., Kudryashov A.* Shack-Hartmann sensor with B-spline approximation 48. *Galaktionov I.V., Toporovsky V.V., Sheldakova J.V., Kudryashov A.V.* **Analysis of hartmannogram images for scattered laser beam focusing by means of high-resolution stacked-actuator mirror.** (2022). International Conference Laser Optics, ICLO 2022: Proceedings.

[DOI: 10.1109/ICLO54117.2022.9839832](https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9839832).

21. *Galaktionov I.V., Nikitin A.N., Sheldakova J.V., Kudryashov A.V.* **B-spline approximation of a wavefront of the ring-shaped detail measured by Shack-Hartmann sensor.** (2022). International Conference Laser Optics, ICLO 2022: Proceedings.

[DOI: 10.1109/ICLO54117.2022.9840322](https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9840322).

22. *Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A.* **Modified Fizeau interferometer with the 4th order polynomial smoothing algorithm.** (2022). ITNT 2022: 8th International Conference on Information Technology and Nanotechnology.

[DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848760](https://doi.org/10.1109/ITNT55410.2022.9848760).

23. *Galaktionov I., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A.* **Efficient technique to measure the concentration value of a scattering suspension using Bouguer-Lambert-Beer law.** (2022). Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, 12216, art. no. 122160U. [DOI: 10.1117/12.2632182](https://doi.org/10.1117/12.2632182).

24. *Galaktionov Ilya, Sheldakova Julia, Nikitin Alexander, Toporovsky Vladimir and Kudryashov Alexis.* **Phase-only spatial light modulator for focusing a moderately scattered visible range laser beam.** (2022). Proc. of SPIE: Laser Beam Shaping XXII, 1221808 (3 October 2022). <https://doi.org/10.1117/12.2631997>

25. *Galaktionov Ilya, Sheldakova Julia, Toporovsky Vladimir and Kudryashov Alexis.* **Numerical analysis of efficiency of light focusing through a moderately scattering medium with the use of deformable mirrors.** (2022). Proc. SPIE 12218, Laser Beam Shaping XXII, 122180C (3 October 2022). <https://doi.org/10.1117/12.2632681>

26. *Galaktionov Ilya, Sheldakova Julia, Toporovsky Vladimir, Kudryashov Alexis.* **Piezoelectric bimorph mirrors with various number of electrodes for scattered laser beam focusing.** (2022). Proc. SPIE 12341: 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, p. 123411T. [DOI: 10.1117/12.2642942](https://doi.org/10.1117/12.2642942).

27. *Goev A.G.* **Some Features of the Mantle Transition Zone on the Kola Peninsula** // Dokl. Earth Sc. 2022. № 506, p. 804–808.

<https://doi.org/10.1134/S1028334X22600402>

28. *Goev A.G., Sanina I.A., Konstantinovskaya N.L., Ovchinnikova O.V.* **Opportunities for Studying Weak Seismicity in the Central Part of the East European Craton Using the «Aleksandrovka». Broadband Seismic Station** // Moscow university geology bulletin, 2022, vol. 77, No. 1, p. 147–155.

[DOI: 10.3103/S0145875222010069](https://doi.org/10.3103/S0145875222010069).

29. *Goncharov E.S., Lyakhov A.N., Losseva T.V.* **Long-Term Schumann Resonance Dynamics Based on Horizontal Magnetic Field Data at Mikhnevo Observatory During 2016–2020** // Radio Science, 2022, vol. 57, No. 5, e2021RS007366.

[DOI: 10.1029/2021RS007366](https://doi.org/10.1029/2021RS007366).

30. *Gorbunova E.M., Batukhtin I.V., Besedina A.N., Petukhova S.M.* **Hydrogeological Responses of Fluid-Saturated Collectors to Remote Earthquakes.** (2022). Springer Geology, pp. 203–214.

[DOI: 10.1007/978-3-030-76328-2\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76328-2_22).

31. *Gorbunova E.M., Besedina A.N., Sanina I.A., Konstantinovskaya N.L.* **A response of the «reservoir-well» system to distant earthquakes** // Geodynamics

& Tectonophysics, 2022, vol. 13, No. 2, p. 2–6.

[DOI: 10.5800/GT-2022-13-2s-0630](https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0630).

32. Gorbunova E., Besedina A., Kabychenko N., Batukhtin I., Petukhova S. **Study of hydrogeological responses of dual porous collectors to dynamic deformation of rock mass.** (2022). AIP Conference Proceedings, 2509, № 020077. [DOI: 10.1063/5.0084437](https://doi.org/10.1063/5.0084437).

33. Igumenov A.Y., Mel'nikov I.V., Afanas'ev A.A., Popova S.S., Lukinykh S.N., Tambasov I.A. **Reflectometric Measurement of Temperature Using a Single-Mode–Multimode–Single-Mode Fiber-Optic Structure** // Technical Physics Letters. 2022.

[DOI: 10.21883/PJTF.2022.17.53281.19267](https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.17.53281.19267).

34. Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M., Cheremnykh A.V. **Some Possibilities of Lineament Analysis When Mapping Faults of Different Ranks: Case Study of the Baikal Region** // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2022, Vol. 58, No. 9, p. 1086–1099.

[DOI: 10.1134/S0001433822090092](https://doi.org/10.1134/S0001433822090092).

35. Kanev F., Rukosuev A., Makenova N., Veretekhin I. **Development of optical vortices in a beam propagating in a turbulent atmosphere.** (2022). International Conference Laser Optics, ICLO 2022: Proceedings. [DOI: 10.1109/ICLO54117.2022.9840237](https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9840237).

36. Khazins V.M., Solov'ev S.P., Loktev D.N., Krashennnikov A.V., Shuvalov V.V. **Nearsurface Air Layer Pollution with Micronic Dust Particles** // Journal of Mining Science, 2022, Vol. 58, No. 4, pp. 676–689. [DOI: 10.1134/S1062739122040160](https://doi.org/10.1134/S1062739122040160).

37. Kitov I.O., Sanina I.A. **Analysis of sequences of aftershocks initiated by underground nuclear tests carried out in north Korea on 09.09.2016 and 03.09.2017** // Seismic Instruments, 2022. V. 58, № 3, p. 25–42. [DOI: 10.21455/si2020.3-2](https://doi.org/10.21455/si2020.3-2).

38. Klochkova V., Sheldakova J., Galaktionov I., Nikitin A., Kudryashov A., Belousov V., Rukosuev A. **Local Correction of the Light Position Implemented on an FPGA Platform for a 6 Meter Telescope** // Photonics, 2022, vol. 9, No. 5, p. 322.

[DOI: 10.3390/photonics9050322](https://doi.org/10.3390/photonics9050322)

39. Kozlov, S.I., Bekker, S.Z., Lyakhov, A.N. et al. **A Semiempirical Approximate Method for Investigating Some Problems of the Aeronomy of the D-Region of the Ionosphere. I. Basic Principles of Method Development and Basic Equations** // Geomagn. Aeron. 2022. 62, p. 607–613. [DOI: 10.1134/S0016793222050073](https://doi.org/10.1134/S0016793222050073).

40. Kocharyan G.G., Loktev D.N., Ryakhovskiy I.A., Sanina I.A. **Large-scale research facilities «mid-latitude» geophysical observation complex «Mikhnevo»** // Geodynamics & Tectonophysics, 2022,

vol. 13, No. 2, p. 1–6. [DOI: 10.5800/GT-2022-13-2-0590](https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0590).

41. Kocharyan G.G., Budkov A.M. & Kishkina S.B. **Effect of Slip Zone Structure on Earthquake Rupture Velocity** // Phys Mesomech. 2022. № 25, p. 549–556. <https://doi.org/10.1134/S1029959922060078>

42. Kocharyan G.G., Sharafiev Z.Z., Kishkina S.B., Chengzhi Qi. **Phenomenon of reduction in friction at the toe of gravity Landslide under seismic vibration effect** // Journal of Mining Science, 2022, vol. 58, No. 2, p. 173–183. [DOI: 10.1134/S1062739122020016](https://doi.org/10.1134/S1062739122020016).

43. Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V. et al. **Laboratory Study on Frictional Behavior of Rock Blocks of Meter Scale. Methods and Preliminary Results** // Izv., Phys. Solid Earth. 2022. № 58, p. 929–940.

<https://doi.org/10.1134/S1069351322060064>.

44. Kocharyan G, Qi C., Kishkina S., Kulikov V. **Potential triggers for large earthquakes in open pit mines: a case study from Kuzbass, Siberia** // Deep Underground Science and Engineering. 2022. P. 1–14.

[DOI: 10.1002/dug2.12028](https://doi.org/10.1002/dug2.12028).

45. Konovalov A.V., Stepnov A.A., Turuntaev S.B. **Possible Connection Between Recent Seismicity and Fluid Injection in the Offshore Oil and Gas Field Area of Sakhalin Island, Russia** // Pure and applied geophysics, 2022. [DOI: 10.1007/s00024-022-03006-y](https://doi.org/10.1007/s00024-022-03006-y).

46. Krashennnikov A.V., Loktev D.N., Soloviev S.P., Spivak A.A. **Compact Laser Devices for Measuring Airborne Microparticle Concentrations and Their Application at the Geophysical Monitoring Center of the Sadovsky Institute of Dynamics of Geospheres, Russian Academy of Sciences** // Seismic Instruments, 2022, vol. 58, No. 3, p. 235–243. [DOI: 10.3103/S0747923922030082](https://doi.org/10.3103/S0747923922030082).

47. Krashennnikov Alexey V., Rybnov Yuri S., Soloviev Sergey P. and Rybnov Sergey Y. **Microparticles variations concentration during the mass explosions at the Lebedinsky quarry.** (2022). Proc. SPIE 12341: 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123415J (7 December 2022). <https://doi.org/10.1117/12.2644398>

48. Krashennnikov Alexey V., Loktev Dmitry N. and Soloviev Sergey P. **Numerical theoretical modeling of the aerosol atmospheric pollution and electric field strength relationship basing on the GMC IDG RAS data.** (2022). Proc. SPIE 12341: 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123416W (7 December 2022). <https://doi.org/10.1117/12.2645139>.

49. Kudryashov A.V., Samarkin V.V. **Adaptive optics for aberration correction in PW lasers.** (2022). International



Conference Laser Optics, ICLO2022: Proceedings.

[DOI:10.1109/ICLO54117.2022.9839672](https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9839672).

50. Lobkovsky L.I., Ramazanov, M.M., Semiletov I.P., Alekseev D.A. **Mathematical Model of the Decomposition of Unstable Gas Hydrate Accumulations in the Cryolithozone** // Geosciences. 2022, № 12, p. 345.

<https://doi.org/10.3390/geosciences12090345>

51. Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Ramazanov M.M., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Semiletov I.P., Alekseev D.A. **Trigger Mechanisms of Gas Hydrate Decomposition, Methane Emissions, and Glacier Breakups in Polar Regions as a Result of Tectonic Wave Deformation** // Geosciences. 2022, № 12, p. 372.

<https://doi.org/10.3390/geosciences12100372>

52. Losseva T.V., Kosarev I.B., Poklad Yu.V., Lyakhov A.N., Zetser Yu.I., Urvachev E.M. **Numerical Simulations of the First Stage of Dynamics of a High-Speed Plasma Jet in Fluxus and North Star Active Geophysical Rocket Experiments** // Plasma Physics Reports, 2022, vol. 48, No. 10, p. 1106–1110.

[DOI: 10.1134/S1063780X2260058X](https://doi.org/10.1134/S1063780X2260058X).

53. Lyakhov Andrey N., Goncharov Egor S., Losseva Tatiana V. **Experimental and theoretical study of Schumann resonance.** (2022). Proc. SPIE 12341: 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123417C (7 December 2022). [DOI: 10.1117/12.2644767](https://doi.org/10.1117/12.2644767).

54. Morozova K.G., Ostapchuk A.A. **Relationship Between the State of a Shear Crack in a Granulated Material and Acoustic Emission and Deformation**//Data.Acoust.Phys.(2022).68,p.496–501.<https://doi.org/10.1134/S1063771022050086>

55. Naticchioni L., Iudochkin N., Yushkin V., Majorana E., Perciballi M., Ricci F., Rudenko V. **Seismic noise background in the Baksan Neutrino Observatory** // European Physical Journal Plus, 2022, vol. 137, No. 1, p.124. [DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-02317-8](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-02317-8).

56. Nikitin A.N., Galaktionov I., Sheldakova J., Kudryashov A., Denisov D., Zolotukhina A. **Calibration of a Shack-Hartmann wavefront sensor using spherical wavefronts from a point source.** (2022). Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, 11987, № 119870J.

[DOI: 10.1117/12.2615161](https://doi.org/10.1117/12.2615161).

57. Novikova E.V., Trimonova M.A., Nachev V.A. and Dubinya N.V. **Impact of the Back-Stress Effect on Horizontal Stress Values Calculation in Hydraulic Fracturing Experiments.** Paper presented at the 56th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Santa Fe, New Mexico, USA, June 2022.

<https://doi.org/10.56952/ARMA-2022-0402>.

58. Ostapchuk A., Polyatykin V., Popov M., Kocharyan G. **Seismogenic Patches in a Tectonic Fault Interface** // Frontiers in Earth Science, 2022, vol. 10. [DOI:10.3389/feart.2022.904814](https://doi.org/10.3389/feart.2022.904814).

59. Poklad Y.V., Ryakhovsky I.A., Gavrilov B.G., Ermak V.M., Kozakova E.N., Achkasov N.S. **Investigation of the Reaction of Schumann Resonances to Short Transient Geophysical Events Under the Influence of Atmospheric Electromagnetic Noise** // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022. 127 (16), e2022JD036820. [DOI: 10.1029/2022JD036820](https://doi.org/10.1029/2022JD036820).

60. Putans V.A., Trimonova M.A., Merklin L.R. **Hidden hydrosphere under the Caspian sea: geophysic evidence and sea level influence** // Interpretation 2022. <https://doi.org/10.1190/int-2021-0102.1>

61. Riabova S. **Variations in the Electric Field Parameters During Magnetic Storms in 2018.** (2022). Springer Geology, pp. 293–304.

[DOI: 10.1007/978-3-030-76328-2\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76328-2_30).

62. Riabova S., Spivak A., Rybnov Y. **Change of Time Variations in Acoustic Vibrations in the Atmospheric Surface Layer in Moscow During Production Restrictions Due to Covid-19 Quarantine Measures in 2020.** (2022). Springer Geology, pp. 271–275.

[DOI: 10.1007/978-3-030-76328-2\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76328-2_27).

63. Riabova S.A., Shalimov S.L. **Geomagnetic Variations Observed on the Earth's Surface and Associated with Strong Earthquakes** // Izv., Phys. Solid Earth. 2022. № 58, p. 469–483.

<https://doi.org/10.1134/S1069351322040085>

64. Riabova S.A., Shalimov S.L. **On the Repeatability of Geomagnetic Jerks from Observations at Mid-Latitude Observatories** // Dokl. Earth Sc.2022. № 506,p.778–781.<https://doi.org/10.1134/S1028334X22600384>

65. Rukosuev A.L., Nikitin A.N., Belousov V.N., Sheldakova J.V., Toporovsky V.V., Kudryashov A.V. **Airflow turbulence testing by decomposition of the wavefront of probing laser radiation by Zernike polynomials.** (2022). International Conference Laser Optics, ICLO 2022: Proceedings.

[DOI: 10.1109/ICLO54117.2022.9839721](https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9839721).

66. Rybnov Yu. S., Riabova S.A., Spivak A.A. **Acoustic and Magnetic Effect of a Falling Bolide on November 17, 2021** // Doklady Earth Sciences, 2022, vol. 504, No. 2, p. 385–389.

[DOI: 10.1134/S1028334X22060137](https://doi.org/10.1134/S1028334X22060137).

67. Rybnov Yu.S., Riabova S.A., Romanovsky Ya.O., Spivak A.A. **Atmospheric effects caused by the fall of the Izhevsk bolide on November 17. 2021.** (2022).

Proceedings of SPIE: 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics; Atmospheric Physics. 1234157.

<https://doi.org/10.1117/12.2643673>.

68. *Samarkin V., Alexandrov A., Galaktionov I., Kudryashov A., Nikitin A., Rukosuev A., Toporovsky V., Sheldakova J.* **Wide-Aperture Bimorph Deformable Mirror for Beam Focusing in 4.2 PW Ti:Sapphire Laser** // Applied Sciences, 2022, vol. 12, No. 3, p. 1144.

[DOI: 10.3390/app12031144](https://doi.org/10.3390/app12031144).

69. *Samarkin V.V., Alexandrov A.G., Galaktionov I.V., Kudryashov A.V., Nikitin A.N., Rukosuev A.L., Toporovsky V.V., Sheldakova Yu.V.* **Large-aperture adaptive optical system for correcting wavefront distortions of a petawatt Ti:sapphire laser beam** // Quantum Electronics, 2022, vol. 52, No. 2, p. 187.

[DOI: 10.1070/QEL17989](https://doi.org/10.1070/QEL17989).

70. *Shpak P.M., Turuntaev S.B., Trimonova M.A., Tairova A.A., Belyakov G.V., Iudochkin, N.A.* **The Model of Cohesionless Sediment Blowout with an Increase in the Methane Flow Rate** // Geosciences. 2022, № 12, p. 423.

<https://doi.org/10.3390/geosciences12110423>

71. *Schmalen A., Luther R., Artemieva N.* **Campo del Cielo modeling and comparison with observations: I. Atmospheric entry of the iron meteoroid** // Meteoritics and Planetary Science, 2022. [DOI: 10.1111/maps.13832](https://doi.org/10.1111/maps.13832).

72. *Sheldakova J.V., Belousov V.N., Nikitin A.N., Toporovsky V.V., Rukosuev A.L., Kudryashov A.V.* **Statistical analysis of a wavefront distorted by laboratory turbulence in terms of Zernike polynomials.** (2022). Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, 11987, № 119870L. [DOI: 10.1117/12.2614533](https://doi.org/10.1117/12.2614533).

73. *Sheldakova J., Galaktionov I., Nikitin A., Alexandrov A., Kudryashov A., Belousov V., Rukosuev A.* **FPGA based laser beam stabilization system.** (2022). Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, 11987, № 119870C. [DOI: 10.1117/12.2614525](https://doi.org/10.1117/12.2614525).

74. *Shuvalov V.V.* **Generation of Tsunami Waves During the Fall of 10-km Asteroids into the Ocean** // Solar System Research, 2022, vol. 56, No. 4, p.271–277. [DOI: 10.1134/S0038094622030066](https://doi.org/10.1134/S0038094622030066).

75. *Soloviev Alexander, Kotov Alexander, Martyanov Mikhail, Perevalov Sergey, Zemskov Roman, Starodubtsev Mikhail, Alexandrov Alexander, Galaktionov Ilya, Samarkin Vadim, Kudryashov Alexis et al.* **Improving focusability of post-compressed PW**

**laser pulses using a deformable mirror** // Opt. Express. 2022. № 30, p. 40584–40591.

[DOI: 10.1364/OE.471300](https://doi.org/10.1364/OE.471300).

76. *Spivak A.A., Rybnov, Yu.S., Riabova S.A.* **A Complex Prognostic Feature of Dangerous Atmospheric Events** // Doklady Earth Sciences, 2022, vol. 504, No.1, p. 291–295.

[DOI: 10.1134/S1028334X22050154](https://doi.org/10.1134/S1028334X22050154).

77. *Spivak A.A., Riabova S.A.* **Geophysical Effects of Strong Atmospheric Fronts** // Doklady Earth Sciences, 2022, vol.501, p. 22–26.

[DOI: 10.1134/S1028334X22010081](https://doi.org/10.1134/S1028334X22010081).

78. *Spivak A.A., Ovtchinnikov V.M., Rybnov Y.S. et al.* **Seismic, Atmospheric-Wave, Electrical, and Magnetic Effects of Powerful Atmospheric Fronts** // Izv., Phys. Solid Earth. 2022. № 58, p.493–506. <https://doi.org/10.1134/S1069351322040115>

79. *Taurenis D.A., Barabash N.S., Ryakhovskiy I.A. and Romanovskiy Ya.O.* **Estimates of TEC change caused by solar flares.** (2022). Proc. of SPIE: 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123417P (7 December 2022). <https://doi.org/10.1117/12.2646664>

80. *Toporovsky V., Kudryashov A., Nikitin A., Rukosuev A., Sheldakova J.* **Real-Time Correction of a Laser Beam Wavefront Distorted by an Artificial Turbulent Heated Airflow** // Photonics, 2022, vol. 9, No. 5, p.351. [DOI: 10.3390/photonics9050351](https://doi.org/10.3390/photonics9050351).

81. *Toporovsky V., Kudryashov A., Skvortsov A., Rukosuev A., Samarkin V., Galaktionov I.* **State-of-the-Art Technologies in Piezoelectric Deformable Mirror Design** // Photonics, 2022, vol. 9, No. 5, p. 321.

[DOI: 10.3390/photonics9050321](https://doi.org/10.3390/photonics9050321).

82. *Toporovsky V., Lyuy P., Denisov D., Zolotukhina A., Nikitin A., Kudryashov A.* **The method of designing an optical-electronic imaging system for correcting the parameters of the wavefront of laser radiation transmitted through a turbulent atmosphere.** (2022). Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, 11987, № 119870N.

[DOI: 10.1117/12.2616105](https://doi.org/10.1117/12.2616105).

83. *Toporovsky V.V., Kudryashov A.V., Skvortsov A.A., Samarkin V.V., Sheldakova J.V., Rukosuev A.L.* **Nanotechnology for Creating Modern Piezoelectric Wavefront Correctors** // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2022, vol. 86, No. 6, p.733–737. [DOI: 10.3103/S1062873822060302](https://doi.org/10.3103/S1062873822060302).

84. *Toporovsky V., Samarkin V., Kudryashov A., Panich A., Sokalov A., Malykhin A., Sheldakova J.* **Robust stack-array deformable mirror for laser beam**

- control.** (2022). Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, 11987, № 119870M. DOI: [10.1117/12.2614509](https://doi.org/10.1117/12.2614509).
85. *Toporovsky V., Samarkin V., Kudryashov A., Alexandrov A., Galaktionov I., Nikitin A., Rukosuev A., Sheldakova J.* **Wide-aperture deformable mirror for correcting and improving focusing of multi-petawatt Ti:Sa laser beam.** (2022). Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering, 11987, № 119870F. DOI: [10.1117/12.2614522](https://doi.org/10.1117/12.2614522).
86. *Toporovsky V.V., Skvortsov A.A., Kudryashov A.V., Samarkin V.V., Rukosuev A.L., Sheldakova J.V.* **Parallel-gap resistance microwelding for deformable mirror manufacturing.** (2022). International Conference Laser Optics, ICLO 2022: Proceedings. DOI: [10.1109/ICLO54117.2022.9840189](https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9840189).
87. *Toporovsky V.V., Kudryashov A.V., Samarkin V.V., Panich A.A., Sokallo A.I., Malykhin A.Yu.* **Stroke analysis of piezocomb stack-array deformable mirrors.** (2022). International Conference Laser Optics, ICLO 2022: Proceedings. DOI: [10.1109/ICLO54117.2022.9839916](https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9839916).
88. *Toporovsky V.V., Kudryashov A.V., Samarkin V.V., Galaktinov I.V., Rukosuev A.L.* **Zernike polynomial generation with high-resolution bimorph deformable mirror.** (2022). ITNT 2022: 8th International Conference on Information Technology and Nanotechnology. DOI: [10.1109/ITNT55410.2022.9848711](https://doi.org/10.1109/ITNT55410.2022.9848711).
89. *Toporovskiy Vladimir, Kudryashov Alexis, Sheldakova Julia, Galaktionov Ilya, Samarkina Vadim.* **Deformable piezoelectric mirrors with high density of control elements.** (2022). Proc. of SPIE: 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, pp.1234111. DOI: [10.1117/12.2645061](https://doi.org/10.1117/12.2645061).
90. *Toporovsky Vladimir, Kudryashov Alexis, Rukosuev Alexey, and Galaktionov Ilya.* **Evaluation of bimorph deformable mirror performance through Zernike polynomials reconstruction.** (2022). Proc. of SPIE: Laser Beam Shaping XXII, 1221807 (3 October 2022). <https://doi.org/10.1117/12.2632915>
91. *Toporovsky Vladimir, Samarkin Vadim, Kudryashov Alexis, and Galaktionov Ilya.* **Bimorph deformable mirror parameters optimization in atmospheric applications.** (2022). Proc. of SPIE: Laser Beam Shaping XXII, 1221806 (3 October 2022). <https://doi.org/10.1117/12.2632914>
92. *Ustinov S., Ostapchuk A., Svecherevskiy A., Usachev A., Gridin G., Grigor'eva A., Nafigin I.* **Prospects of Geoinformatics in Analyzing Spatial Heterogeneities of Microstructural Properties of a Tectonic Fault // Applied Sciences, 2022, vol. 12, No. 6, p. 2864. DOI: [10.3390/app12062864](https://doi.org/10.3390/app12062864).**
93. *Васильев И.А., Дубиня Н.В., Тихоцкий С.А., Начев В.А., Алексеев Д.А.* **Численная модель механического отклика самоподъемной плавучей буровой установки на сейсмические воздействия // Компьютерные исследования и моделирование, 2022, т. 14, № 4, с. 853–871.**
94. *Горбунова Э.М., Ряховский И.А., Гаврилов Б.Г., Поклад Ю.В., Петухова С.М., Беседина А.Н.* **Вариации геофизических полей при извержении вулкана Тонга по данным уникальной научной установки «Михнево» // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 4. С. 5–22**
95. *Кочарян Г.Г., Остапчук А.А.* **Мезоструктура зоны скольжения тектонического разлома // Физ. мезомех. 2022. Т. 25. № 5. С. 94–105.**
96. *Кишкина С.Б., Бугаев Е.Г., Лободенко И.Ю.* **Техногенные землетрясения при анализе безопасности площадок АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. 2022. № 4(106).**
97. *Куликов В.И., Шарафиев З.З.* **Сейсмическое действие массовых взрывов при подземной разработке Коробковского железорудного месторождения на застройку и население г. Губкин// Вопросы инженерной сейсмологии. 2022. Т. 49, № 4, с. 79–90. <https://doi.org/10.21455/VIS2022.4-5>**
98. *Морозова К.Г., Остапчук А.А., Беседина А.Н., Павлов Д.В.* **Классификация сейсмических событий, сопровождающих взрывной способ разработки массива горных пород // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58, № 4. С.25–42. DOI: [10.21455/si2022.4-6](https://doi.org/10.21455/si2022.4-6).**
99. *Подобная Е.Д., Попова О.П., Глазачев Д.О.* **Оценка траектории метеороидов по марсианским кластерам // Вестник Томского государственного университета: Математика и механика. 2022. № 80. С. 97–107.**
100. *Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Ряховский И.А.* **Изменения частот Шумановских резонансов во время рентгеновской вспышки X8.2 класса 10 сентября 2017 года // Physics of auroral phenomena. 2022. Т. 45, № 1. С. 118–121. DOI: [10.51981/2588-0039.2022.45.028](https://doi.org/10.51981/2588-0039.2022.45.028).**
101. *Рига В.Ю., Турунтаев С.Б.* **Сейсмичность при разработке месторождений углеводородов // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2022. № 9 (129). С. 32–39.**
102. *Рыбнов Ю.С., Крашенинников А.В., Соловьев С.П., Рыбнов С.Ю.* **Мониторинг пылегазовых**



облаков при проведении массовых взрывов на Лебединском карьере // Рациональное освоение недр, 2022, vol. 63, No. 1, p. 58–61.  
[DOI: 10.26121/RON.2022.62.67.009](https://doi.org/10.26121/RON.2022.62.67.009).

103. Санина И.А., Константиновская Н.Л. Особенности идентификации карьерных взрывов в центральной части Восточно-Европейской платформы по данным малоапертурной группы «Михнево» // Российский сейсмологический журнал. 2022. Т. 4. № 2. С. 23–32.

104. Федоров И.С., Асминг С.В., Гоев А.Г., Волосов С.Г. Расширение сети сейсмических наблюдений на Кольском полуострове // Российский сейсмологический журнал, 2022, vol. 4, No. 1, p.63–72. [DOI: 10.35540/2686-7907.2022.1.05](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.1.05).

105. Цветков Л.А., Цветкова С.Л., Пустовалов А.А., Вербецкий Н.Н., Баранов В.Н., Мандругин А.А. Радионуклиды для  $\beta$ -вольтаических атомных батарей (миниатюрных, энергоемких, с многолетним сроком службы) // Радиохимия, 2022, vol. 64, No. 3, p. 281–288.

[DOI: 10.31857/S00338311210300X](https://doi.org/10.31857/S00338311210300X).

106. Шарафиев Э.Э., Куликов В.И. Сейсмозрывное воздействие подземных горных работ на населенную над шахтную застройку города Губкин // Взрывное дело. 2022. № 134–91. С. 120–136.

#### ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГЕОСФЕРАХ

(электронный журнал)

107. Овчинников В.М., Усольцева О.А. Об особенностях волн РКiKP и PсP под Восточной Азией и западной окраиной Тихого океана // Динамические процессы в геосферах. 2022. 14(2):1–9.  
[https://doi.org/10.26006/29490995\\_2022\\_14\\_2\\_1](https://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_1)

108. Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Батухтин И.В., Петухова С.М. Постсейсмические эффекты массовых взрывов, выделенные при разработке железорудных месторождений КМА // Динамические процессы в геосферах. 2022. 14(1):51–68.  
[https://doi.org/10.26006/22228535\\_2022\\_14\\_1\\_51](https://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_51)

109. Барышников Н.А., Зенченко Е.В., Турунтаев С.Б. Применение метода регуляризации квадратичного отклонения для анализа результатов лабораторных исследований нелинейных фильтрационных потоков // Динамические процессы в геосферах. 2022. 14(1):85–92.  
[https://doi.org/10.26006/22228535\\_2022\\_14\\_1\\_85](https://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_85)

110. Тауренис Д.А., Барабаш Н.С., Ряховский И.А. Динамика ПЭС во время солнечных вспышек X

класса // Динамические процессы в геосферах. 2022. 14(1):110–117.

[https://doi.org/10.26006/22228535\\_2022\\_14\\_1\\_110](https://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_110)

111. Спивак А.А. В. В. Адушкин – из поколения создателей // Динамические процессы в геосферах. 2022. 14(1):130–140.

[http://doi.org/10.26006/22228535\\_2022\\_14\\_1\\_130](http://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_130)

112. Новикова Е.В., Тримонова М.А., Турунтаев С.Б., Зенченко Е.В., Зенченко П.Е. Оценка давления образования трещины в лабораторных экспериментах по гидроразрыву пласта // Динамические процессы в геосферах. 2022. 14(2):40–51.  
[https://doi.org/10.26006/29490995\\_2022\\_14\\_2\\_40](https://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_40)

113. Торрес Т.М., Юдочкин Н.А., Таурова А.А., Беляков Г.В. Фильтрация жидкости в среде с переменной проницаемостью // Динамические процессы в геосферах. 2022. 14(2):52–61.  
[https://doi.org/10.26006/29490995\\_2022\\_14\\_2\\_52](https://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_52)

114. Начев В.А., Гребенщикова Е.М. Численное моделирование поведения пороупругопластического искусственного материала в процессе проведения ГРП // Динамические процессы в геосферах. 2022. 14(2):62–74.  
[https://doi.org/10.26006/29490995\\_2022\\_14\\_2\\_62](https://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_62)

115. Шувалов В.В. Численное моделирование торможения астероидов в атмосфере Венеры // Динамические процессы в геосферах. 2022. 14(2):92–98.  
[https://doi.org/10.26006/29490995\\_2022\\_14\\_2\\_92](https://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_92)

116. Ефремов В.В., Попова О.П., Глазачев Д.О., Карташова А.П. Определение параметров мелких метеорных тел: сравнение моделей пористого и сплошного тел // Динамические процессы в геосферах. 2022. 14(2):99–117.  
[https://doi.org/10.26006/29490995\\_2022\\_14\\_2\\_99](https://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_99)

117. Подобная Е.Д., Попова О.П., Глазачев Д.О. Модель фрагментации для ударных кластеров на Марсе // Динамические процессы в геосферах. 2022. 14(2):106–114.  
[https://doi.org/10.26006/29490995\\_2022\\_14\\_2\\_106](https://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_106)

Отчет о научной и научно-организационной деятельности ИДГ РАН за 2022 год.  
Утвержден к печати Ученым советом  
от 19.01.2023 г. № 01/23

© ИДГ РАН, 2023  
Отпечатано в типографии ООО «МАКИН ПРИНТ»  
121353 г. Москва, ул. Беловежская, д. 47