

## Юбилейный год ИКИР ДВО РАН

В рамках празднования 60-летия организации комплексных магнито-ионосферных наблюдений на Дальнем Востоке, 55-летия с начала наблюдений на обсерватории «Паратунка», 35-летия образования ИКИР ДВО РАН в 2022 году состоялся цикл научных семинаров, на которых были представлены к обсуждению полученные научные результаты подразделений.

### Лаборатория акустических исследований

Лаборатория акустических исследований ИКИР ДВО РАН, возглавляемая старшим научным сотрудником, к.ф.-м.н. Мищенко М. А., проводит мониторинг сигналов геоакустической эмиссии в пунктах комплексных геофизических наблюдений: Микижа, Карымшина, Козыревск и Крутоберёгово. Здесь установлены системы регистрации на основе направленных гидрофонов, при помощи которых производится запись потоков импульсных акустических сигналов.

Под руководством старшего научного сотрудника, к.ф.-м.н. Луковенковой О. О. ведётся разработка и применение современных методов цифровой обработки и анализа импульсных сигналов. В рамках данного направления для анализа частотно-временного состава геоакустических сигналов разработан и успешно применяется метод адаптивного согласованного преследования.

Ведущий научный сотрудник, д.т.н. Сенкевич Ю. И. с коллегами проводит работы по поиску аномалий группового поведения импульсного потока сигнала геоакустической эмиссии и комплексному анализу аномальных динамических закономерностей распределения параметров геоакустической эмиссии.

Старшие научные сотрудники, к.ф.-м.н. Щербина А. О. и к.ф.-м.н. Солодчук А. А. работают над изучением особенностей применения векторно-фазовых методов для локации источников геоакустических сигналов в мелких водоёмах. В результате разработано несколько методов определения направления на источники геоакустического излучения: амплитудный способ по эллиптичности импульсов и с помощью вектора потока акустической мощности. Разработан способ локации источников геоакустической эмиссии по разнице во времени прихода прямой и отражённой волн при известных условиях регистрации сигнала. Разработан усовершенствованный алгоритм выделения импульсов.

Также сотрудниками лаборатории совместно с коллегами Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН проводятся комплексные исследования высокочастотной геоакустической эмиссии и приповерхностного электрического поля. Ещё одно фундаментальное направление, которое активно развивает младший научный сотрудник Гапеев М. И. с коллегами в лаборатории - это моделирование областей

повышенных сдвиговых деформаций при подготовке камчатских землетрясений. Особенности формирования таких областей определяют характер возникающих аномалий геоакустической эмиссии. Показано, результаты моделирования согласуются с данными натурных наблюдений при подготовке ряда камчатских землетрясений.

## Лаборатория физики атмосферы

Лаборатория физики атмосферы под руководством главного научного сотрудника, д.ф.-м.н. Богданова В. В. представила результаты комплексных исследований динамических процессов, формирующихся в различных геосферных оболочках под воздействием внешних возмущений.

Научным сотрудником лаборатории, к.ф.-м.н. Павловым А. В. осуществлены прогностические оценки области и временного периода сильных Камчатских землетрясений по данным сейсмического мониторинга и ионосферным аномалиям. На основе вероятностной модели сейсмического режима вычислен сейсмический прогностический параметр  $\xi_p$ . Выполнены оценки его прогностической эффективности, достоверности и надёжности. На основе Байесовского подхода произведены прогностические оценки вероятностей наступления сильных землетрясений с энергетическим классом  $K_S \geq 13.5$  в области ожидания, определённой на основе анализа аномальных значений параметра  $\xi_p$  и построены среднесрочные карты ожидания. Выполнены оценки прогностической эффективности ионосферных параметров и определён комплекс наиболее информативных ионосферных прогностических признаков для Камчатского региона. Проведён совместный ретроспективный анализ карт распределения аномальных значений сейсмического параметра  $\xi_p$  и комплекса ионосферных предвестников, что позволило получить оценки вероятности, области ожидания и временного периода наступления землетрясений с  $K_S \geq 13.5$ , произошедших в Камчатском регионе за период 2009-2018 гг.

## Лаборатория моделирования физических процессов

Ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего лаборатории моделирования физических процессов, к.ф.-м.н. Водичар Г. М. представил результаты по эредитарным моделям космических динамо-систем. Реальные динамо-системы планет и звезд демонстрируют сложные динамические режимы. Среди них есть и квазипериодические с хаотическими компонентами, и крайне нерегулярные с большим разбросом интервалов полярности магнитного поля. Водичар Г. М. привел обзор работ лаборатории моделирования физических процессов по исследованию маломодовых моделей динамо-систем с учетом эффекта памяти (эредитарности) в подавлении турбулентного генератора спиральностью поля. В рамках простейшего двумодового приближения, динамо можно рассматривать как осциллятор с эредитарным потенциалом, форма которого зависит от прошлых значений магнитного поля. Различные динамические режимы, наблюдаемые в реальных системах, хоро-

шо интерпретируются как движения в таком потенциале. Показано, что включение в модель стохастической компоненты, моделирующей спонтанное образование и разрушение когерентных структур из мелкомасштабных мод, позволяет воспроизвести фрактальные свойства палеогеомагнитной шкалы и степенную асимптотику распределения интервалов полярности.

Научный сотрудник ЛМФП, к.т.н. Шереметьева О. В. и главный научный сотрудник лаборатории электромагнитных излучений д.ф.-м.н. Шевцовым представлены статистическую и дробную модели деформационной активности. В статистической модели пластических деформаций сейсмический процесс рассматривается как процесс случайных блужданий по состояниям, переход в которые определяется пространственно-временной близостью сейсмических событий в будущем/прошлом по отношению к исходному событию. Выбранные в модели пространственно-временные масштабы определяются характеристиками среды и самим сейсмическим процессом: временной масштаб  $t$  [дни] оценивается исходя из закона повторяемости событий Гутенберга-Рихтера, пространственный масштаб  $R$  [км] сейсмического события считается равным радиусу зоны влияния, определяющейся неоднородностью среды. Каталог сейсмических событий раскладывался по пространственно-временным масштабам с учётом направления смещения и максимальной энергии, т. е. выделяли главные энергетические ветви. По результатам получено 65% связанных событий. Отмечено наличие нелокальных эффектов в пространстве и времени, которые связаны с ослаблением или упрочнением среды. Таким образом, изменение свойств среды приводит к смене эффектов и выражается в особенностях блужданий. В дробной модели деформационного процесса случайные дислокационные изменения в объеме  $V$  и временном интервале  $T$ , вызваны работой внешних сил, поддерживающих критический уровень упругих напряжений. Рассмотрен пространственный масштаб  $L(x_k, t_k)$   $k$ -ой дислокации с координатами  $x_k, t_k$ . Тогда все дислокации в рассматриваемом объеме образуют однопараметрический процесс  $L(t) = L(x_k, t_k)$ . В первом приближении можно считать, что случайные величины  $x_k, t_k$  и  $L(x_k, t_k)$  – независимые и процесс – пуассоновский (стандартный, простой). Однако рост плотности дислокаций, увеличение их связанности и образование дислокационного кластера, в котором плотность дислокаций велика настолько, что перекрываются пространственно-временные радиусы влияния, зависящие от  $L(x_k, t_k)$  – первое приближение неприменимо и требуется уточнение модели. Авторами предложен следующий подход: процесс Пуассона определяет фоновый режим, а дробный процесс Пуассона – отклонения от фонового режима, связанные с локальным упрочнением или ослаблением среды. Процессы дислокационных изменений имеют одинаковую структуру на разных масштабных уровнях  $L$  деформационного процесса. Фиксируем пространственный масштаб  $L$ . Выделяем пять режимов деформационной активности:  $s_1$  – фоновый режим (фоновые или нормальные пульсации),  $s_2$  – замирания (замедление пульсаций),  $s_3$  – режим активизации, фаза форшоков,  $s_4$  – режим активизации, фаза главного удара,  $s_5$  – режим релаксации, фаза афтершоков. Характеристикой деформационного процесса является функция Миттага-Леффлёра. Используя данную функцию,

определены вероятности остаться в исходном или перейти в другой режим. Верификация модели проведена на последовательностях форшоков и афтершоков, построенных с помощью статистической модели деформаций. Аппроксимация экспериментальных зависимостей для афтершоков показало наилучшие результаты для функции вероятности  $E_{0.7}(-(0.75\tau)^{0.4})$ , откуда следует наличие свойств эрeditarности и нестационарности в режиме релаксации. На основании полученных результатов по форшоковым последовательностям можно сделать вывод, что деформационный процесс в режиме активизации обладает свойствами эрeditarности и нестационарности (параметры, отвечающие за эти характеристики, принимают значения меньше единицы). Однако надо отметить, что при возрастании энергетического класса форшоков память процесса уменьшается, хотя бы один из параметров  $\nu$  или  $\nu$  принимают значение единица и процесс становится больше пуассоновским. Аппроксимация экспериментальных зависимостей для афтершоков показало наилучшие результаты для функции вероятности  $E_{0.7}(-(0.75\tau)^{0.4})$ .

Научный сотрудник ЛМФП, к.ф.-м.н. Фещенко Л. К., представила работу, в которой описана общая технология составления спектральных моделей динамо в сферических оболочках с помощью систем компьютерной алгебры. Рассмотрен случай кинематического осесимметричного динамо, этого достаточно для описания идеи расчетов. Построение таких моделей сводится к расчету мод, являющихся решениями спектральных задач на собственные моды свободного затухания, и коэффициентов Галеркина. Данная технология позволяет быстро и зачастую аналитически устанавливать равенство нулю коэффициентов, а также вычислять их с управляемой точностью.

Ведущий научный сотрудник ЛМПФ, д.ф.-м.н. Паровик Р. И. представил вопросы исследования дробных осцилляторов – математических моделей колебательных систем со степенной памятью. Эффект памяти или эрeditarности указывает на то, что в колебательной системе текущее ее состояние может зависеть от предыдущих т.е. от предыстории. Такая нелокальность с математической точки зрения описывается с помощью интегро-дифференциальных уравнений с разностными ядрами-функциями памяти. В работе в качестве функций памяти были выбраны степенные функции, что позволило перейти к аппарату дробных производных. Далее в работе приводится примерная классификация осцилляторов с памятью. Для класса дробных осцилляторов, которые представляют собой задачу Коши, приводится обоснование существования и единственности ее решения. Рассматриваются количественные и качественные методы исследования задачи Коши. Количественные методы для дробных осцилляторов могут быть аналитическими или численными. Аналитические методы в основном применимы для линейных дробных осцилляторов и основаны на интегральных преобразованиях или интегральных приближениях. Численные методы основаны на построения конечно-разностных схем, для которых исследуются вопросы устойчивости и сходимости. Качественные методы дают дополнительную информацию о свойствах решения задачи Коши. Например, при каких значениях параметров задачи Коши будут получаться регулярные или хаотические режимы, как ведут себя амплитудно-частотные и фазо-частотные

характеристики при изменении значений порядка дробной производной, исследование точек покоя на асимптотическую устойчивость и т.д. Далее в работе в качестве приложения приводится математическая модель автоколебательного процесса drumbeats (барабанный бой), установленного входе устойчивого выжимания лавового потока при извержении вулкана Кизимен в 2011-2012 гг. В качестве модели был использован нелинейный дробный осциллятор, который описывает процесс прилипания-скольжения. С помощью экспериментальных данных и результатов модельных расчетов проведено моделирование процесса drumbeats.

## Лаборатория системного анализа

В лаборатории системного анализа под руководством главного научного сотрудника, д.т.н. Мандриковой О. В. выполняется разработка методов и специализированных программных средств анализа данных геофизического мониторинга, направленных на изучение процессов в магнитосферно-ионосферной системе и выделение проявлений космической погоды. В лаборатории решаются следующие задачи:

- Моделирование и анализ временного хода параметров ионосферы, изучение его пространственно-временных особенностей. Особое внимание уделяется аномальным проявлениям в параметрах ионосферы, обусловленных повышенной активностью Солнца.

- Моделирование регулярного хода космических лучей и исследование его динамических особенностей в периоды повышенной активности Солнца, а также при взаимодействиях магнитосферы и межпланетной среды.

- Изучение временных вариаций геомагнитного поля и выделение аномальных изменений в периоды возмущений и магнитных бурь.

- Создание комплексных технологий и специализированных программных средств по реализации разработанных методов.

В лаборатории накоплен значительный экспериментальный материал, сформированы и обеспечены средствами обновления базы данных, решаются вопросы создания эффективных методов обработки и анализа регистрируемых геофизических параметров и своевременного обнаружения аномальных проявлений космической погоды. Исследования основаны на комплексном подходе, объединяющем классические методы анализа данных и последние научные достижения в области искусственного интеллекта и цифровой обработки сигналов, включая разработанные в лаборатории системного анализа методы и подходы, подтвердившие свою эффективность в области исследования. В лаборатории на основе разработанных методов и алгоритмов реализованы программные продукты, позволяющие выполнять анализ различных геосферных параметров. Часть программ объединена в общую систему анализа и обработки данных, находящуюся в открытом доступе (<http://lsaoperanalysis.ikir.ru:9180/lsaoperanalysis.html>).

Ведущий научный сотрудник ЛСА, д.ф.-м.н. Смирнов С. Э. представил результаты измерения атмосферного электрического поля, позволяющего изучать многие метеорологические и геофизические процессы. Пункт наблюдения атмосферного

электричества организован на обсерватории Паратунка с 1997г. и продолжается по настоящее время. За это время были обнаружены и исследованы аномалии поля перед сильными сейсмическими событиями. Это, прежде всего, отрицательные аномалии градиента потенциала электрического поля. Наблюдались аномалии высокого уровня спектров мощности в полосе частот внутренних гравитационных волн. Исследован эффект восхода Солнца. Показано, что этот эффект обусловлен конвективными и турбулентными процессами в утренние часы. Обнаружены эффекты проявления космической погоды в электрических характеристиках приземного слоя атмосферы.

## Лаборатория электромагнитных излучений

О связи оптических характеристик атмосферы с радиационными процессами доложил главный научный сотрудник лаборатории электромагнитных излучений, д.ф.-м.н. Шевцов В. М. Он сообщил о благоприятных условиях для лидарных наблюдений в термосфере при возникновении окон прозрачности в стратосфере в августе и сентябре в минимумах солнечной активности. Дано объяснение тому, что лидарный сигнал, рассеянный на ионах атомарного кислорода, меньше чем на ионах атомарного азота, в то время как первых на два порядка больше чем вторых. Причина этого заключается в том, что у кислорода используется для лидарных наблюдений двухэлектронный переход между состояниями атома, а у азота одноэлектронный. В результате сечение рассеяния у иона атома кислорода на три порядка меньше чем у азота. С одной стороны это можно рассматривать как выбор мало эффективного атомарного перехода для наблюдений резонансного рассеяния лазерного излучения в ионосфере, а с другой – это подтверждение того, что лидарные отражения формируются на ионах атомарного кислорода. Полученные результаты позволяют обосновать возможность наблюдений рассеяния лидарного сигнала на нейтральных атомах ионосферы.

Мониторинг естественного импульсного излучения гроз и связь его параметров с состоянием волновода земля-ионосфера представил младший научный сотрудник ЛЭМИ Малкин Е. И. Лаборатория электромагнитных излучений выполняет анализ данных геофизического мониторинга радиоволн в диапазоне очень низких частот (0,3 — 30 кГц), направленных на распознавание источников генерации молний и особенностей их распространения в системе волновода Земля-Ионосфера. В лаборатории решаются такие задачи, как обеспечение непрерывного мониторинга грозовой активности от источников естественного электромагнитного излучения (ЭМИ) в ОНЧ диапазоне, которыми являются различные процессы, происходящие в атмосфере, ионосфере, магнитосфере. Для регистрации ЭМИ от грозовых разрядов в ИКИР ДВО РАН создан ОНЧ-пеленгатор. Одновременно регистрируются ЭМИ с временной точностью до нескольких микросекунд от молний с помощью сегмента мировой сети определения координат грозовых разрядов WWLLNet, показывая отличный результат для мониторинга в случае оптимального расположения пунктов сети. Дополнительно ведётся автоматическое обнаружение и распо-

знание вистлеров с помощью — AWDANET, что предполагает возможность получать более точные данные для моделирования электронной концентрации процессов ускорения и высыпания заряженных частиц в областях плазмосферы с целью изучения космической погоды. К сожалению, из-за редкой сети пунктов в районе полуострова Камчатка, WWLLN регистрирует лишь только мощные грозовые разряды, которые составляют не более 10% от ЭМИ, принятых в том же районе ОНЧ-пеленгатором. Тем не менее, обнаружено, что ОНЧ-пеленгатором в анализе суточных данных отслеживаются Африканский и Азиатский грозовые очаги, а в данных, полученных с помощью WWLLN регистрируются все известные очаги источников мировых гроз. При помощи радиотехнических средств в ИКИР ДВО РАН получена многолетняя база данных, в том числе источником излучения которых являются грозы, образующиеся во время эксплозивных извержений вулканов. Проведен анализ парных разрядов от молний, зарегистрированных в магнитосопряженной точке (Канберра, Австралия) с количеством вистлеров, зарегистрированных на Камчатке. В результате мониторинга сигналов радиостанций РСДН Альфа, расположенных в г. Новосибирск и г. Хабаровск, выявлено воздействие литосферных процессов на свойства радиотрасс.

## Комплексная геофизическая обсерватория "Паратунка"

Ведущий научный сотрудник КГФО "Паратунка к.ф.-м.н. Хомутов С. Ю. представил краткий экскурс в историю магнитных измерений на обсерваториях ИКИР ДВО РАН, начинающейся с Международного геофизического года (1957 г.) и последующих решений Правительства СССР и Президиума АН СССР, принятых в 1960-1962 гг. Рассмотрены достижения:

- успешное ведение мониторинга магнитного поля по стандартам IAGA (регистрация вариаций на фотоленту, абсолютные наблюдения, подготовка часовых значений полного вектора поля —  $H, D, Z$ );

- переход в начале 2000-х с аналоговой аппаратуры на цифровую, завершившуюся сертификацией трёх обсерваторий ИКИР ДВО РАН ("Магадан "Паратунка" и "Хабаровск") международной сетью INTERMAGNET (вариационные измерения с частотой 1 Гц, абсолютные наблюдения в ручном режиме, подготовка минутных значений полного вектора поля);

- переобработка архивов аналоговых магнитограмм и цифровых данных имеющихся с начала 1990-х, и имеющиеся проблемы (кадровые, финансовые, техногенная нагрузка на обсерватории, необходимость модернизации инфраструктуры, модернизация аппаратуры).

Сделаны оценки ближайших перспектив, которые в целом видятся достаточно сложными, и возможных направлений развития.

Ученый секретариат ИКИР ДВО РАН