

Тема № 3:
**«НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОДИНАМИКИ, РАЗРАБОТКА И
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ»**

Рег. № НИОКТР АААА-А19-119011490131-3

Основные результаты за 2020 г.

Тема № 3

Исполнители

- Горшков Александр Иванович д.ф.м.н.
- Исмаил-заде Али Тофик оглы д.ф.м.н.
- Желиговский Владислав Александрович д.ф.м.н.
- Коваленко Михаил Денисович д.ф.м.н.
- Новиков Роман Геннадьевич д.ф.м.н.
- Молчан Георгий Моисеевич д.ф.м.н.
- Подвигина Ольга Михайловна д.ф.м.н.
- Трубицын Валерий Петрович д.ф.м.н.
- Хохлов Андрей Владимирович д.ф.м.н.
- Шаповал Александр Борисович д.ф.м.н.
- Баранов Алексей Андреевич к.ф.м.н.
- Блантер Елена Михайловна к.ф.м.н.
- Воробьева Инесса Анатольевна к.ф.м.н.
- Кержаев Александр Петрович к.ф.м.н.
- Меньшова Ирина Владимировна к.ф.м.н.
- Новикова Ольга Владимировна к.ф.м.н.
- Шнирман Михаил Георгиевич к.ф.м.н.
- Чертовских Роман Александрович к.ф.м.н.
- Ливинский Артем Игоревич
- Семка Максим Андреевич
- Чуваев Андрей Викторович

Направления исследований

- Геодинамика и моделирование геодинамических процессов
- Исследования магнитогидродинамики
- Палеомагнитные исследования
- Задачи теории упругости
- Прямые и обратные задачи

Геодинамика и моделирование геодинамических процессов

Геодинамика Кавказа. В проведенном обзоре рассмотрены геология и геодинамика Кавказа и его окрестностей, включая его палеозойско-палеогеновую и постколлизийную эволюцию до современных деформаций; магматизм и тепловой поток; активная тектонику и тектонические напряжения, вызванные континентальной коллизией. Обсуждаются гравитационные модели, разработанные для Кавказа, связывающие их специфические особенности с региональной системой разломов, и последние геодезических исследования, связанных с региональными движениями. Анализируется региональная сейсмичность с акцентом на подкоровую сейсмичность под северными предгорьями Большого Кавказа. Недавние сейсмические томографические исследования свидетельствуют в пользу отрыва литосферного корня под Малым и Большим Кавказом. Знание геодинамики, сейсмичности и напряженного режима в Кавказском регионе помогает в оценке сейсмической опасности и риска. Был проведен обзор моделирования землетрясений и исследований сейсмической опасности, обеспечивающих связь между глубинными геодинамическими и поверхностными процессами. В работе исследуются существующие пробелы в современных научных знаниях Кавказского региона и предлагаются пути решения задач, которые могут улучшить понимание региональной эволюции, активной тектоники, геодинамики, коровой и глубокой сейсмичности и поверхностных проявлений динамики литосферы.

Работа выполнена группой ученых из России, Армении, Азербайджана, Грузии, Германии, Нидерландов, США и Швейцарии, что само по себе является выдающимся вкладом в международное научное сотрудничество и научную дипломатию. Работа опубликована в журнале

А.Т.Исмаил-Заде, А.И.Горшков, А.А.Соловьев, Грант РФФИ №16-55-12033

Публикация: Ismail-Zadeh, A., S. Adamia, A. Chabukiani, T. Chelidze, S. Cloetingh, M. Floyd, A. Gorshkov, A. Gvishiani, T. Ismail-Zadeh, M. K. Kaban, F. Kadirov, J. Karapetyan, T. Kengerli, J. Kiria, I. Koulakov, J. Mosar, T. Mumladze, B. Müller, N. Sadradze, R. Safarov, F. Schilling, and A. Soloviev, Geodynamics, seismicity, and seismic hazards of the Caucasus, *Earth Sci. Rev.*, 207, 103222, 2020. Q1, JIF= 9.724).

Геодинамика и моделирование геодинамических процессов

- **Тектонические режимы и напряжения в сейсмической зоне Вранча.** В сейсмической зоне Вранча (Румыния) с целью изучения процессов генерации землетрясений и их связи с деформацией литосферы, были оценены параметры очагов землетрясений за период с 2014 по 2020 г., а также определено поле напряжений с помощью инверсии фокального механизма и неконтролируемого машинного обучения. В пределах земной коры максимальное горизонтальное напряжение согласуется с кинематикой поверхностных разломов и геодезическими данными о горизонтальных скоростях плит. Внутри сейсмогенного тела, расположенного на мантийных глубинах, доминируют вертикальные напряжения сжатия. Полученные коэффициенты напряжений оказались небольшими: около 0.2 для мантийных землетрясений с $M_w > 4$ и около 0.4 для $M_w < 4$. Это противоречит предположению о хрупком разрушении. Показано, что повышенное давление порового флюида снижает коэффициенты напряжений. Следовательно дегидратационное охрупчивание может способствовать возникновению сейсмичности на средних глубинах в плите Вранча. Сравнение с сейсмической томографией и исследованиями анизотропии показывает высокую корреляцию между направлениями максимальных горизонтальных напряжений и сейсмической анизотропией, особенно ниже глубин 130 км. Это позволяет предполагать, что окружающий мантийный поток также может способствовать накоплению напряжений в плите, обуславливающих ее сейсмический потенциал.
- **А.Т.Исмаил-Заде**
- *Публикация:* Petrescu, L., Borleanu, F., Radulian, M., Ismail-Zadeh, A., and Matenco, L. Tectonic regimes and stress patterns in the Vrancea Seismic Zone: insights into intermediate-depth seismic nests in locked collisional settings, *Tectonophysics*, accepted, 2020.

Геодинамика и моделирование геодинамических процессов

Блоковая модель динамики литосферы Индо-Бирманской дуги.

Индо-Бирманская дуга представляет собой границу между Индийской и Бирманской плитами. Относительное движение плит имеет существенную сдвиговую компоненту, поэтому неясно, происходит ли субдукция до сих пор. Данные GPS указывают на сближение со скоростью 13-17 мм/год вдоль субгоризонтального раздела Индийской и Бирманской плит, в то время как сдвиги происходят на нескольких субвертикальных разломах, что соответствует закономерностям разделения деформаций в зонах субдукции. Данные сейсмической истории региона недостаточны, чтобы оценить возможность сильных землетрясений на Индо-Бирманском мегатрасте. Использована блоковая модель динамики литосферы, позволяющая моделировать одновременно медленные тектонические движения и землетрясения. Показано, что модель сцепленного мегатраста предпочтительнее, так как она лучше воспроизводит наблюдаемые тектонические скорости. Интегральные характеристики синтетической сейсмичности, такие как магнитудно-частотное распределение землетрясений и уровень сейсмической активности, соответствуют особенностям наблюдаемой сейсмичности. Моделирование свидетельствует о том, что мегатраст сцеплен и может порождать сильные землетрясения с магнитудой более 8, с длительным периодом повторения, превышающим тысячу лет.

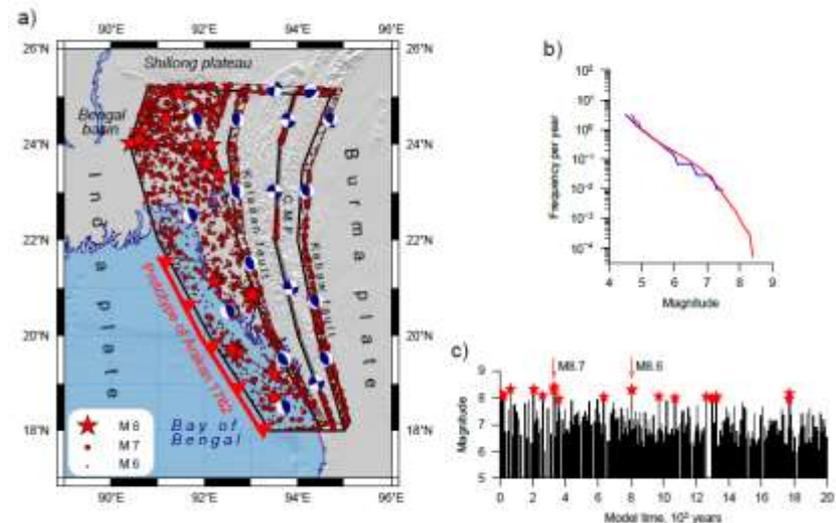


Рис. Синтетическая сейсмичность Индо-Бирманской дуги за 20 тысяч лет, полученная с помощью блоковой модели динамики литосферы. А) – карта эпицентров: сильнейшие землетрясения с $M \geq 8.0$ (красные звездочки) смоделированы в зоне субдукции. Типичные механизмы очагов синтетических землетрясений показаны на каждом сегменте. В) Графики повторяемости модельной и наблюдаемой сейсмичности, нормированные на время. С) временная последовательность модельных землетрясений с $M \geq 6.0$, среднее время повторяемости событий с $M \geq 8.0$ превышает тысячу лет. Максимальная магнитуда $M=8.4$ на южном сегменте. Магнитуда мульти-сегментных землетрясений достигает 8.7 (отмечены стрелками на панели С), их зона разрыва отмечена красным на панели А), такие события могут быть моделью землетрясения Аракан 1762г. с макросейсмической интенсивностью XI.

Воробьева И.А., Горшков А.И. Грант РФФИ № 18-55-45004

Публикация: Vorobieva I., Gorshkov A, Prantik Mandal P. Is Indo-Burman megathrust capable of great earthquakes? Results from the Block-and-Fault Dynamics Modeling. Nature Geosciences (готовится к подаче)

Геодинамика и моделирование геодинамических процессов

Расчеты изгибных напряжений и деформаций в океанических плитах.

Сильные и частые землетрясения происходят на стыках океанических и континентальных плит в зонах субдукции при достижении критических деформаций сдвига. В нашей стране исторически деформации и напряжения изучаются в основном на континентах. Однако необходимо знать напряжения и в океанических плитах. При этом их расчет облегчен тем, что форма поверхности изгибно деформированной плиты уже известна по данным топографии дна океана. Рассмотрено современное состояние теории изгибных напряжений в океанических плитах и в уточненной постановке рассчитано распределение напряжений в Японской плите. При этом найдены зоны пластической деформации, где рассчитанное напряжение превосходит предел прочности пород. В дальнейшем предполагается исследовать корреляции областей рассчитанных аномальных деформаций с расположением очагов внутриплитных землетрясений, являющихся форшоковыми и афтершоковыми для основных сильных субдукционных землетрясений

Трубицын В.П.

Публикация: Бирючева Е.О., Трубицын В.П., Деформации и напряжения в океанических плитах. Пятая тектонофизическая конференция “К столетию М.В. Гзовского”. 5-9 октября 2020

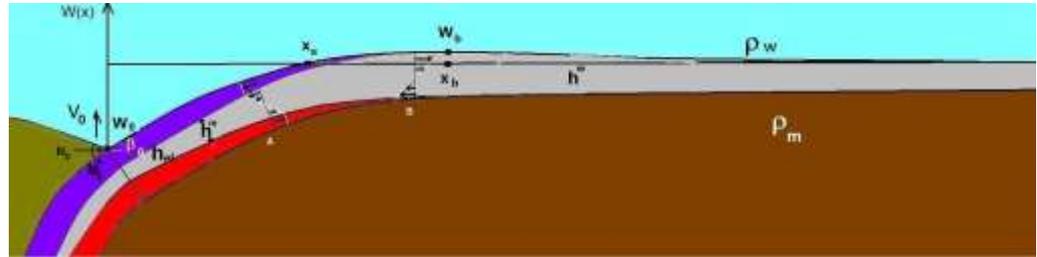
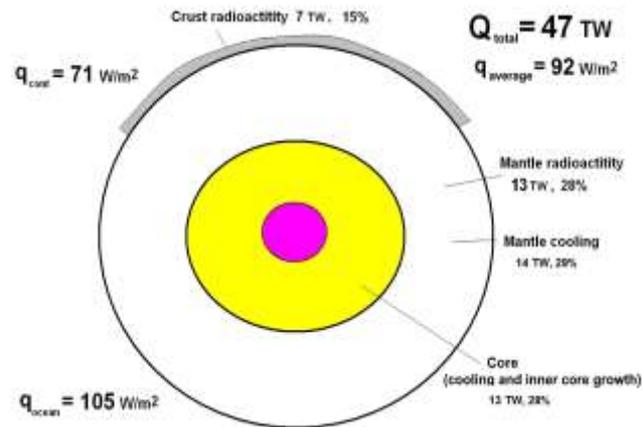


Рис. Изгибы океанической плиты $W(x)$ вблизи желоба. Толщина плиты и масштаб по вертикальной оси преувеличен. При длине плиты в несколько сотен км. глубина желоба W_0 составляет несколько км, высота внешнего поднятия W_b несколько сот метров, а типичный угол субдукции β_0 на дне желоба всего несколько градусов. В желобе на торец плиты действуют горизонтальная сила сжатия N_0 , вертикальная сила V_0 и толщиной h_e . Фиолетовым – зона растяжений с хрупкой пластичностью, красным - зона сжатия с пластическим течением. Выделена область плиты, ограниченная двумя сечениями А и В. Правый торец В области находится в зоне с чисто упругой деформацией, а левый А- уже в зонах разной реологии. Стрелками показаны упругие напряжения $\sigma_{xx}(x,z)$, приложенные к торцам выделенной части плиты. h_M и h_m – эффективные упругие толщины правой и левой частей плиты относительно внешнего поднятия.

Геодинамика и моделирование геодинамических процессов

Построение моделей глобальных геодинамических процессов. Рассмотрено современное представление о процессах тепло-массо-переноса в мантии Земли. Тепловая конвекция вызвана более высоким нагревом низов мантии. Поэтому для расчета конвекции в мантии и ее геодинамических проявлений необходимо знать источники нагрева мантии. Новым является анализ и переоценка теплового баланса в мантии. По оценкам состава магм Земля остывает со скоростью 80К/млрд лет. По данным измерения полный поток тепла из Земли составляет 47 ТВт. Источниками тепла в мантии, вызывающими конвекцию, являются тепловой поток из ядра, выделение тепла при радиоактивном распаде и выделение тепла, происходящее благодаря остыванию вещества мантии. Чтобы оптимально согласовать имеющиеся данные и результаты численного моделирования сделан вывод о том, что вклады этих трех источников тепла примерно равны и составляет примерно 13 ТВт. Ранее тепловой поток из ядра оценивали по температуре магм горячих точек. При этом считали, что именно мантийные плюмы, зарождающиеся на границе с ядром, поглощают основное тепло, поступающее из ядра. Это давало слишком низкое значение потока из ядра порядка 5-8 ТВт. Ряд авторов, чтобы согласовать проявления конвекции, предлагали брать более высокое содержание радиоактивных изотопов в мантии, даже более высокое по сравнению с космическим обилием, что не возможно.

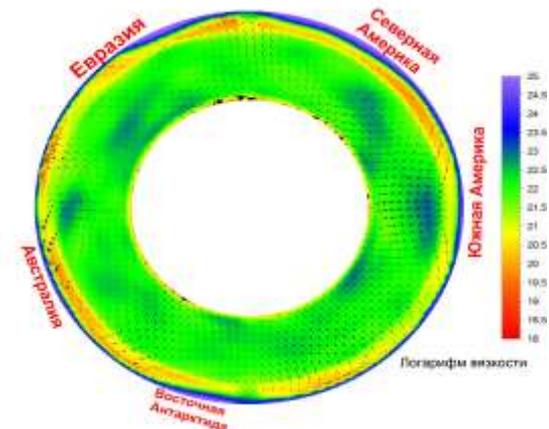


Трубицын В.П.

Публикация: V. Trubitsyn, A. Trubitsyn, M. Evseev, A. Evseev //The Processes of Heat and Mass Transfer in the Earth's Mantle. Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering. Springer Nature Switzerland AG. Received 14 July 2020 Received in revised form 1 September 2020 . (в печати)

Построение мгновенной трехмерной модели мантии Земли на основе данных сейсмической томографии. Использована методика обработки геофизических данных в модели облачных технологий, позволяющих повысить эффективность вычислительных ресурсов за счет их виртуализации и обеспечения эластичности. Была решена задача численного моделирования сферической мантийной конвекции на основе данных сейсмической томографии. Уравнение Стокса решается методом конечных элементов с помощью программного кода CitcomS. Определена структура мантийных течений в современной Земле. Установлено, что под континентами кроме Восточной Африки, Юго-Восточной и Восточной Азии, и Западной Антарктиды находятся нисходящие мантийные потоки и отрицательные аномалии температуры. Нисходящий мантийный поток под Евразией и восходящий поток под Арктикой, толкают Северную Евразию на юг, порождая напряжения в коре и процессы горообразование внутри Евразии. Еще один мощный нисходящий мантийный поток возникает между Америками в Карибской зоне субдукции. Древние кратоны характеризуются холодными областями мантии под ними. Под Восточной Африкой находится положительная температурная аномалия и восходящий мантийный поток, ответственный за систему рифтов на поверхности африканского континента. Похожая аномалия обнаруживается и в районе Байкальской рифтовой зоны. Глобальный восходящий поток находится под Тихим океаном.

Распределение логарифма вязкости и скоростей в мантии в сечении Земли по 110 и 290 градусу восточной долготы



Баранов А.А., Чуваев А.В.

Публикации: Чуваев А.В., Баранов А.А., Бобров А.М. Численное моделирование конвекции в мантии Земли с использованием облачных технологий. Вычислительные технологии. 2020. 25(2): 103–117. DOI:10.25743/ICT.2020.25.2.009

Баранов А. А., Бобров А. М., Чуваев А.В. Влияние реологии мантии на поле скоростей течений и динамическую топографию поверхности для трехмерной сферической модели Земли. Пятая тектонофизическая конференция “К столетию М.В. Гзовского”. 5-9 октября 2020.

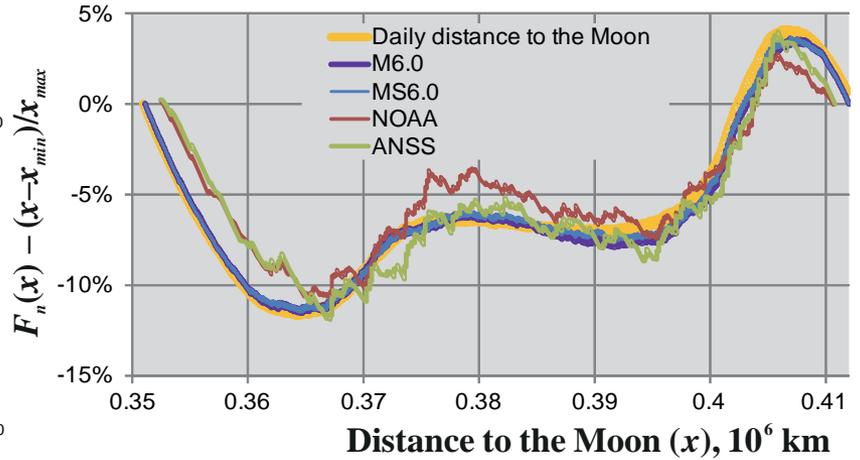
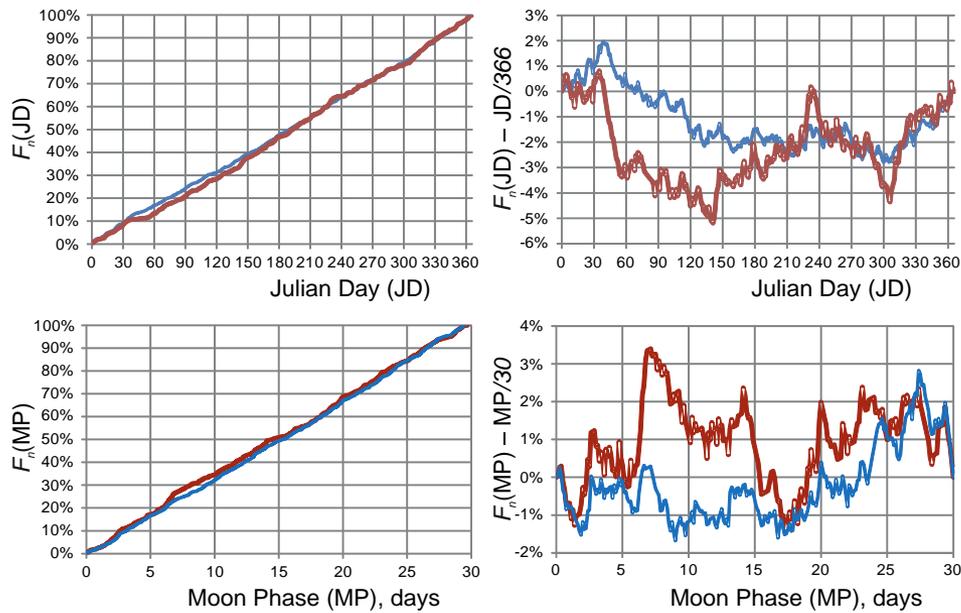
Геодинамика и моделирование геодинамических процессов

Реакция литосферы Земли на догловременную периодическую

гравитационную нагрузку. Существующие данные о времени возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 7.5$ во всем мире, основанные на каталогах землетрясений, не позволяют отвергнуть нулевую гипотезу о случайном совпадении в любое время земного или лунного циклов. В частности, непараметрическая статистика критерия Кюйпера для циклических вариаций, применяемая к эмпирическим распределениям времени возникновения землетрясения с $M \geq 7.5$ по дате (JD) и фазе Луны (MP), не позволяет отвергнуть нулевые гипотезы равномерного распределения в соответствующие циклы. С другой стороны, Кюйпера позволяет отвергнуть нулевые гипотезы одинаковой вероятности возникновения на любую дату JD или фазу MP для сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$, по крайней мере, в течение последних четырех десятилетий предположительно лучшего определения параметров землетрясений (в частности, для землетрясений в Северном полушарии с явной сезонной вариацией). **Статистика непараметрического двухвыборочного теста Колмогорова – Смирнова предполагает отсутствие предпочтительных расстояний до Луны при возникновении сильных землетрясений.** Полученные результаты строгой статистической проверки гипотез важны для лучшего понимания сложной сейсмической реакции литосферы Земли на догловременную периодическую гравитационную нагрузку.

Кособоков В.Г.

Публикация: Kossobokov, V.G., Panza, G.F. (2020) A Myth of Preferred Days of Strong Earthquakes? *Seismological Research Letters* 91 (2A): 948–955.



Upper row, left: The empirical cdf's $F_n(x)$ for the 951 date ($x = \text{JD}$) of the origin times of magnitude $M \geq 7.5$ earthquakes from NOAA, 115-2018 (blue) and 453 earthquakes of magnitude $M \geq 7.5$ from USGS ANSS, 1900-2018 (heavy red). Upper row, right: The cdf's deviation from the uniform distribution, $D(x) = F_n(x) - x/366$, for 951 earthquakes from NOAA 115-2018 (blue) and 453 earthquakes from USGS ANSS, 1900-2018 (red). Lower row, left: The empirical cdf's $F_n(x)$ for the Moon Phase ($x = \text{MP}$) of the 914 origin times of magnitude $M \geq 7.5$ earthquakes from NOAA, 115-2018 (blue) and 453 earthquakes of magnitude $M \geq 7.5$ from USGS ANSS, 1900-2018 (heavy red). Lower row, right: The Moon Phase cdf's deviation from the uniform distribution, $D(x) = F_n(x) - x/29.53$ (on average), for 951 earthquakes from NOAA, 115-2018 (blue) and 453 earthquakes from USGS ANSS, 1900-2018 (red). The empirical cumulative distribution functions (cdf's) of JD and MP follow nicely the diagonals of the uniform distributions

The deviation of the empirical cdf of the distance to the Moon (abscissa, in Mkm = 10^6 km) from the uniform distribution model for the origin times of $M \geq 7.5$ earthquakes from NOAA (red) and ANSS (green) catalogs, and the $M \geq 6.0$ earthquakes (violet) and main shocks (blue) from GHDB, along with for the Kepler's law daily distance to the Moon (orange), all in 1900-2018.

Исследования магнитогидродинамики

- Рассмотрена кинематическая генерация пространственно-периодическим течением электропроводной жидкости магнитных мод Блоховского типа вида произведения трехмерного поля, имеющего такую же периодичность, на гармонику Фурье с произвольным постоянным волновым вектором \mathbf{q} . Проведены расчеты магнитных мод с максимальным по \mathbf{q} инкрементом роста γ для модельного течения общего вида (в таких течениях присутствует магнитный α -эффект) и для центрально-симметричного модельного течения (в таких течениях α -эффект отсутствует, но в течении присутствует отрицательная магнитная вихревая диффузия, также именуемая β -эффект). Показано, что магнитные моды с максимальным по \mathbf{q} инкрементом роста характеризуются слабым разделением пространственных масштабов. Этот результат, по-видимому, означает, что, вопреки общепринятой точке зрения, указанные эффекты (как правило, ассоциирующиеся с существенным разделением масштабов) не могут считаться основными механизмами генерации космических магнитных полей; по-видимому, реальные природные механизмы характеризуются иерархией масштабов, течение жидкости данного масштаба генерирует поля несколько большего масштаба, а из-за нелинейности происходит взаимодействие процессов на всех масштабах, составляющих иерархию.
- **Желиговский В.А., Чертовских Р.А.**
- *Публикация:* Желиговский В.А., Чертовских Р.А. О кинематической генерации магнитных мод блоховского типа. Физика Земли №1, 2020, 118-132. (Перевод на англ.: Zheligovsky V.A., Chertovskih R.A. On kinematic generation of the magnetic modes of Bloch type. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 56, 2020, 104-117.

Исследования магнитогидродинамики

- Предложена классификация и доказаны достаточные условия асимптотической устойчивости для некоторого класса (т.н., ac-networks) гетероклинических сетей в \mathbb{R}^n , существующих в эквивариантных (симметричных) системах с группой симметрий, порождаемой симметриями изменения знака одной из пространственных координат. Найдены все возможные типы графов, отвечающие таким сетям. Условия асимптотической устойчивости имеют вид неравенств зависящих от собственных значений оператора линеаризации и применимы к более общему классу гетероклинических сетей, чем рассмотренные (ac-networks), при выполнении условий теорем.
- **Подвигина О.В.**
- *Публикация:* Podvigina O., Castro S.B.S., Labouriau I.S. Asymptotic stability of robust heteroclinic networks. Nonlinearity, 33, 2020, 1757-1788.

- Доказано, что, если начальные скорость течения жидкости и магнитное поле - аналитические функции пространственных переменных, то решение системы трехмерных уравнений идеальной магнитогидродинамики аналитично по пространственным переменным и времени на некотором временном интервале строго положительной длины. С использованием свойства замороженности магнитного поля построены разложения решения в лагранжевых координатах в ряды Тейлора по времени. Для их коэффициентов выведены рекуррентные соотношения. Эти результаты положены в основу алгоритмов численного интегрирования рассматриваемой системы уравнений по времени. Показана принципиальная применимость Лагранжева алгоритма. В решении наблюдается образование структур меньших размерностей. Уже при $t \approx 1.5$ использованное пространственное разрешение 256^3 гармоник Фурье оказывается недостаточным, и на изоповерхностях появляется численная "рябь".
- **Желиговский В.А., Подвигина О.М.**
- *Публикация:* Желиговский В.А., Подвигина О.М. Численный алгоритм интегрирования по времени задач идеальной магнитогидродинамики, опирающийся на аналитичность их решений. Физика Земли №2, 2020, 148-160. (Перевод на англ.: Zheligovsky V.A., Podvigina O.M. A numerical algorithm for time integration of the problems of ideal magnetohydrodynamics based on analyticity of their solutions. Izvestiya, Physics of the solid Earth, 56, 2020, 279-290.)

Палеомагнитные исследования

- Предложена модель калибровки в реальном времени скалярного магнитометра, установленного на спутнике Swarm. Она основывается на предположении того, что фиксируемые среднеквадратические отклонения показаний отвечают схеме вероятностной смеси, причем смешивающее распределение логнормально. Это же предположение справедливо в гораздо большей общности, кроме того показано как явно получить (решая систему нелинейных уравнений) точечные оценки параметров смешивающего распределения.

Хохлов А.В. грант РФФИ 17-77-20034

Публикация: Khokhlov A. Remark on the Swarm data residual distribution. Preprint April 2020
DOI: 10.21203/rs.3.rs-23276/v

- Проведен явный анализ магнитной бури с точки зрения геометрии направлений для возмущающих добавок к обычному магнитному полю Земли.

Хохлов А.В. грант РФФИ 17-77-20034

Публикация: Хохлов А., Пилипенко В., Красноперов Р. И., Николова Ю., Добровольский М. 2020. АНАЛИЗ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ ПОЛЯРНЫХ ДИАГРАММ. Физика Земли, 6, 135-144

- Проведен обзор и анализ статистических методов, применяемых для анализа нестандартно устроенных данных измерений пространственного векторного поля: измерения модуля вектора, собственно векторные измерения, измерения одних лишь направлений. Конкретные результаты, ранее полученные авторами, собраны и представлены в виде единой теории с учетом возможной неединственности решений.

Хохлов А.В. грант РФФИ 17-77-20034

Публикация: Khokhlov A.V., V.P. Shcherbakov and F. Lhuillier (2020), Using the Giant Gaussian Process model from paleodirectional and paleointensity data to investigate paleomagnetic secular variation, Russ. J. Earth Sci., 20, doi:10.2205/2020ES000710.

Задачи теории упругости

- Составлен обзор основных публикаций, посвященных развитию метода начальных функций (МНФ) и его применению к решению различных инженерных проблем. МНФ используется не в классической форме, а в пространстве преобразований Фурье. Это позволяет еще больше упростить его использование, сводя решение краевых задач к несложным алгебраическим преобразованиям. Окончательные решения представляются либо в виде несобственных интегралов Фурье, либо в виде разложений в ряды по собственным функциям краевой задачи – функциям Папковича–Фадля. На различных примерах рассмотрены основные приемы работы с МНФ в пространстве преобразований Фурье. Показано применение метода к решению задач для плоскости с разрывами перемещений. Решения получаются быстро, просто и, в отличие от классического решения, без использования теории функций комплексного переменного.

Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П. РНФ № 19-71-00094

Публикации: Matrosov A.V., Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P. Method of initial functions and integral Fourier transform in some problems of the theory of elasticity. Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Physik, 2020, **71**(1), 24. DOI: 10.1007/s00033-019-1247-3.

- (Web of Science, Scopus, Q1).

Задачи теории упругости

- Впервые построены примеры точных решений неоднородной краевой задачи теории упругости в прямоугольной области с разными граничными условиями на ее сторонах (свободные стороны; две стороны заземлены, а две другие свободны; все четыре стороны заземлены). Неоднородные задачи существенно сложнее и более трудоемки, чем однородные. Граничные условия по сторонам прямоугольника могут быть любыми. Эта задача является ключевой при построении решений задач о сбросе остаточных напряжений с образованием разрывов с учетом массовых сил. Все решения представляются в замкнутой форме – в виде рядов по собственным функциям Папковича–Фадля. В основе точных решений лежит развиваемая авторами теория разложений по собственным функциям Папковича–Фадля, базирующаяся на разработанной авторами теории преобразования Бореля в классе квазицелых функций экспоненциального типа. По результатам исследования были сделаны два доклада на международных конференциях: “2020 10th International Conference on Applied Physics and Mathematics (ICAPM 2020)” и “12th Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (AMiTaNS'20)”.

Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П. Грант РФФ № 19-71-00094 и грант РФФИ–ГФЕН № 20-51-53021 ГФЕН_а

Публикации: Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П., Yu G. Неоднородная задача теории упругости в полуполосе. Точное решение. Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2020. № 6. С. 33–39.

Kerzhaev A.P. Two nonhomogeneous boundary value problems for a rectangle: Exact solutions. Journal of Physics: Conference Series, 2020, **1593**, 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1593/1/012009.

Задачи теории упругости

- Впервые построены примеры точных решений однородной краевой задачи теории упругости в прямоугольнике с разными граничными условиями на его сторонах: 1) горизонтальные стороны прямоугольника свободны, а на торцах заданы нормальные или касательные напряжения; 2) ко всем сторонам прямоугольника приложены касательные напряжения. Все решения представляются в замкнутой форме – в виде рядов по собственным функциям Папковича–Фадля. В основе точных решений лежит развиваемая авторами теория разложений по собственным функциям Папковича–Фадля, базирующаяся на разработанной авторами теории преобразования Бореля в классе квазицелых функций экспоненциального типа.

Коваленко М.Д., Меньшова И.В., Кержаев А.П. Грант РФФ № 19-71-00094 и грант РФФИ–ГФЕН № 20-51-53021 ГФЕН_а

Публикация: Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Yu G. Eigenfunction expansion for the elastic rectangle. Journal of Physics: Conference Series, 2020, **1593**, 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/1593/1/012008.

Kovalenko M.D., Menshova I.V., Kerzhaev A.P., Yu G. A boundary value problem in the theory of elasticity for a rectangle: exact solutions. Z. Angew. Math. Phys., 2020, **71**(6), 199. DOI: 10.1007/s00033-020-01425-2. (Web of Science, Scopus, Q1).

Прямые и обратные задачи

Глобальная единственность в пассивной обратной задаче гелиосейсмологии

Установлено, что акустические параметры Солнца могут быть определены по оптическим наблюдениям с солнечных спутников. Более точно, в рамках сферической модели показано, что наблюдения на двух высотах над фотосферой и на двух частотах выше акустической частоты среза однозначно определяют такие акустические параметры Солнца, как скорость звука, плотность и коэффициент поглощения. Проведено численное моделирование, которое подтверждает этот теоретический результат.

Новиков Р.Г.

Публикация: Agaltsov A.D., Hohage T., Novikov R.G. (2020). Global uniqueness in a passive inverse problem of helioseismology, *Inverse Problems* 36(5), 055004 (21pp)

Продолжены исследования по обратной задаче рассеяния без фазовой информации. Такие задачи наиболее важны, когда в качестве зондирующего инструмента используются элементарные частицы (например, рентгеновские фотоны).

Новиков Р.Г.

Публикации: Agaltsov A.D., Novikov R.G., Error estimates for phaseless inverse scattering in the Born approximation at high energies, *Journal of Geometric Analysis* 30(3), 2340-2360 (2020) Novikov R.G., Sivkin V.N., Error estimates for phase recovering from phaseless scattering data, *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications* 8(1), 44-61 (2020)

Novikov R.G., Multipoint formulas for phase recovering from phaseless scattering data, *Journal of Geometric Analysis*, <https://link.springer.com/article/10.1007/s12220-019-00329-6>

Прямые и обратные задачи

Предложен новый тип сверх-явных асимптотических формул для решения некоторых прямых и обратных задач рассеяния. Этот подход демонстрируется на примере нахождения дальнего рассеянного поля при фиксированных частоте и направлениях по n замерам волнового поля в относительной близости от рассеивающего объекта. Результаты используют, в частности, теорию матриц Вандермонда.

Новиков Р.Г.

Публикация Novikov R.G., Multipoint formulas for scattered far field in multidimensions, Inverse Problems 36(9) 095001 (2020)

Сделан очередной шаг к полному решению задачи поставленной в 1988 г. в работе П.Г.Гриневича и академика С.П. Новикова. Задача относится к области обобщенных аналитических функций с контурными полюсами, возникающих в двумерных обратных задачах рассеяния и в теории солитонов в размерности $2+1$.

Новиков Р.Г.

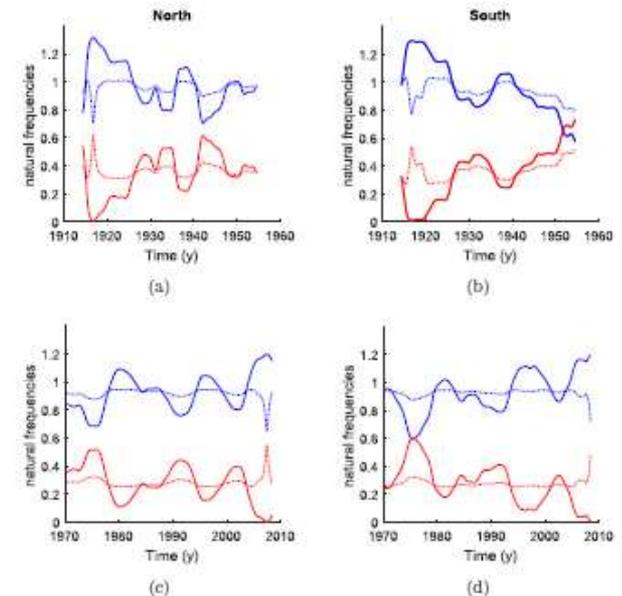
Публикация: Grinevich P.G., Novikov R.G., Creation and annihilation of point-potentials using Moutard-type transform in spectral variable, Journal of Mathematical Physics 61(9), 093501 (2020)

Прямые и обратные задачи

Исследованы особенности решения обратной задачи в моделях Курамото с малым числом нелинейно связанных неидентичных осцилляторов. Рассматривалось решение обратной задачи в условиях устойчивой фазовой синхронизации в применении к восстановлению свойств меридионального потока Солнца по фазовой эволюции тороидальной и полоидальной компонент солнечного магнитного поля в северной и южной полусферах. В модели с тремя осцилляторами получено устойчивое восстановление естественных частот приповерхностной (Рис. 1, синим) и глубинной (Рис 1, красным) ячеек меридиональной циркуляции вне интервала десинхронизации, соответствующего аномальному 20-му солнечному циклу. Полученный результат соответствует современным представлениям о быстрых скоростях меридионального потока вблизи поверхности Солнца и его медленной скорости в глубине зоны конвекции.

Шнирман М.Г., Блантер Е.М.

Рис. 1 Эволюция естественных частот приповерхностной (синим) и глубинной (красным) ячеек меридиональной циркуляции в северной (слева) и южной (справа) солнечной полусфере до (сверху) и после (снизу) интервала десинхронизации.



Публикация: Elena Blanter, Mikhail Shnirman (2020) Inverse Problem in the Kuramoto Model with a Phase Lag: Application to the Sun, International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 30, No. 12, 2050165 (15 pages) DOI: 10.1142/S0218127420501655

Прямые и обратные задачи

Исследовалось влияние несимметрии коэффициентов связи неидентичных осцилляторов на однозначность решения обратной задачи по восстановлению связей между осцилляторами. Показано, что если коэффициент асимметрии известен, восстановление однозначно. Показано, что если известна только общая связь, то коэффициент асимметрии в общем случае (Рисунок 2, панель а) однозначно восстанавливается только в условиях слабой связи. Помимо общего случая рассмотрены различные случаи вырождения. Показано, что в зависимости от интерпретации гелиосейсмологических данных система, соответствующая циркуляционным ячейкам солнечного меридионального потока является или случаем общего положения, позволяющим однозначное восстановление в условиях слабой связи, или вырожденным случаем, в котором восстановление принципиально неоднозначно.

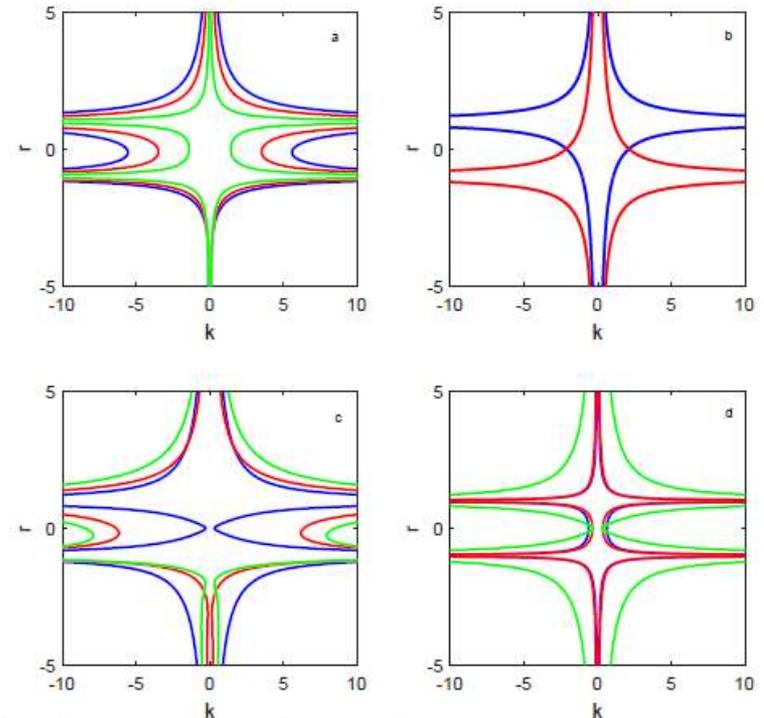


Рис. 1. Зависимость между суммарной связью и коэффициентом несимметрии среднего осциллятора при фиксированном значении $\alpha = 1.5$ радиана— (а)–(с), при фиксированных естественных частотах $\omega_1 = 0.9, \omega_2 = 0, \omega_3 = 0.9$ — (d). Параметры: (а) – случай общего положения $\omega_1 = 0.9, \omega_2 = 0.8, \omega_3 = 0.1$ (синий), $\omega_1 = 0.8, \omega_2 = 0.7, \omega_3 = 0.3$ (красный), $\omega_1 = 0.7, \omega_2 = 0.6, \omega_3 = 0.5$ (зеленый); (b) – вырожденный случай $\omega_1 = 0.6, \omega_2 = 0.9, \omega_3 = 0.3$ (синий), $\omega_1 = 0.9, \omega_2 = 0.3, \omega_3 = 0.6$ (красный); (с) – при нулевой естественной скорости одного из осцилляторов $\omega_1 = 0.9, \omega_2 = 0, \omega_3 = 0.9$ (синий), $\omega_1 = 0.9, \omega_2 = 0.9, \omega_3 = 0$ (красный), $\omega_1 = 0.3, \omega_2 = 0, \omega_3 = 1.5$ (желтый); (d) – при разных значениях α : $\alpha = 0.5$ (синий), $\alpha = 1$ радиан (красный), $\alpha = 1.5$ радиана (желтый)

Блантер Е.М., Шнирман М.Г.

Публикация: Блантер Е.М., Елаева М.С., Шнирман М.Г. (2020) СИНХРОНИЗАЦИЯ И НЕСИММЕТРИЯ В МОДЕЛИ КУРАМОТО ИЗ ТРЕХ НЕИДЕНТИЧНЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ: ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕРИДИОНАЛЬНОГО ПОТОКА СОЛНЦА, Компьютерные исследования и моделирование, том 12, номер 2. Стр: 345-356, DOI: [10.20537/2076-7633-2020-12-2-345-356](https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-2-345-356)

Прямые и обратные задачи

Показано, что восстановление связи между солнечными индексами с помощью уравнений Курамото и Ван дер Поля может приводить к близким оценкам. Для этого сформулирована обратная задача по восстановлению связи по решениям соответствующих уравнений. Для каждой системы уравнений мы построили алгоритм, решающий обратную задачу, и показали, что существует интервал умеренных положительных значений корреляции между осцилляторами, для которого построенные алгоритмы практически одинаково восстанавливают связь. Нижняя граница этого интервала зависит от разности между собственными частотами модельных осцилляторов. Мы применяем алгоритмы восстановления к солнечному индексу ISSN и геомагнитному индексу aa, которые представляют тороидальную и полоидальную компоненты магнитного поля Солнца. Их корреляция для всех солнечных циклов кроме 20-го и, возможно, 21-го, принадлежит интервалу значений, на котором наши алгоритмы восстанавливают близкие значения. Наши результаты связывают эффективное восстановление характеристик солнечной активности проведённое Блантер и др. [Sol. Phys. 2014, 289, 4309; Sol. Phys. 2016, 291, 1003] по модели Курамото со стандартными методами анализа, основанными на уравнениях магнитного гидродинамо

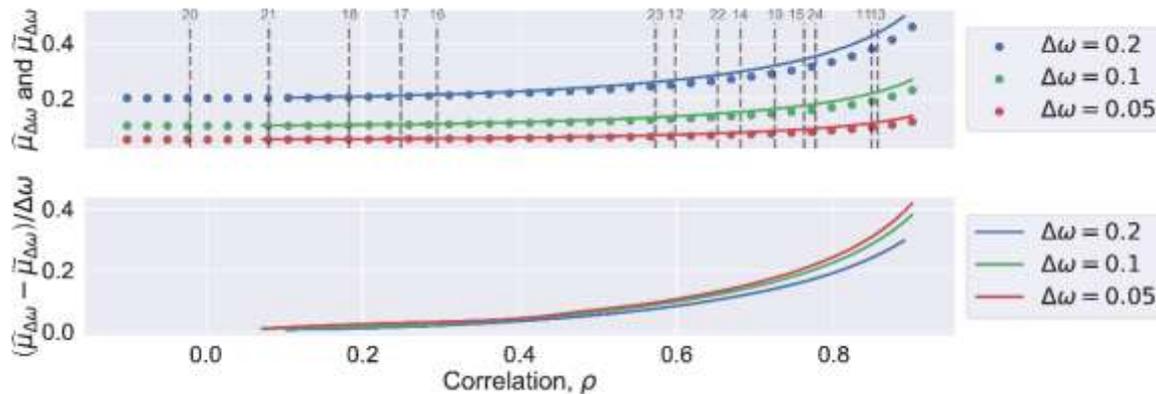


Рисунок представляет результаты восстановления связи между осцилляторами, выполненного на основе уравнений Курамото и Ван дер Поля; пунктирные линии указывают значения корреляций для конкретных солнечных циклов (сверху); разность между двумя восстановлениями, найденная при трёх реалистичных значениях разности частот между двумя модельными осцилляторами.

Шаповал А., Шнирман М.Г.

Публикация: A. Savostyanov, A. Shapoval, M. Shnirman, Reconstruction of the Coupling Between Solar Proxies: When Approaches Based on Kuramoto and Van der Pol models Agree with Each Other Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2020, V. 83, 105149, <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2019.105149>