

## Изучение физических процессов в недрах Земли, планетарной эволюции и геодинамики

1. Построены двумерные и трехмерные сферические модели мантийной конвекции с плавающими континентами. Практически во всех имеющихся моделях мантийной конвекции исследуются ее особенности, но эти модели остаются идеализированными, т.к. начальные условия берутся произвольными. В отчетном периоде впервые построена трехмерная сферическая геодинамическая модель реальной Земли. В качестве начальных данных взято температурное поле, пересчитанное по данным сейсмической томографии, а положение и форма континентов взяты с географической карты. Решение уравнения Стокса на сетке  $72 \times 144 \times 216$  с этими данными показало распределение мантийных течений, рельеф Земли и тепловой мантийный поток, скорости дрейфа континентов, а также гравитационное поле. Все эти поля оказались согласующимися с данными наблюдений не по одному параметру, а с точностью до 20-ой гармоники. Таким образом, впервые в мире построена трехмерная геодинамическая модель Земли, согласующаяся со всем комплексом имеющихся данных измерения.

### Контактная информация

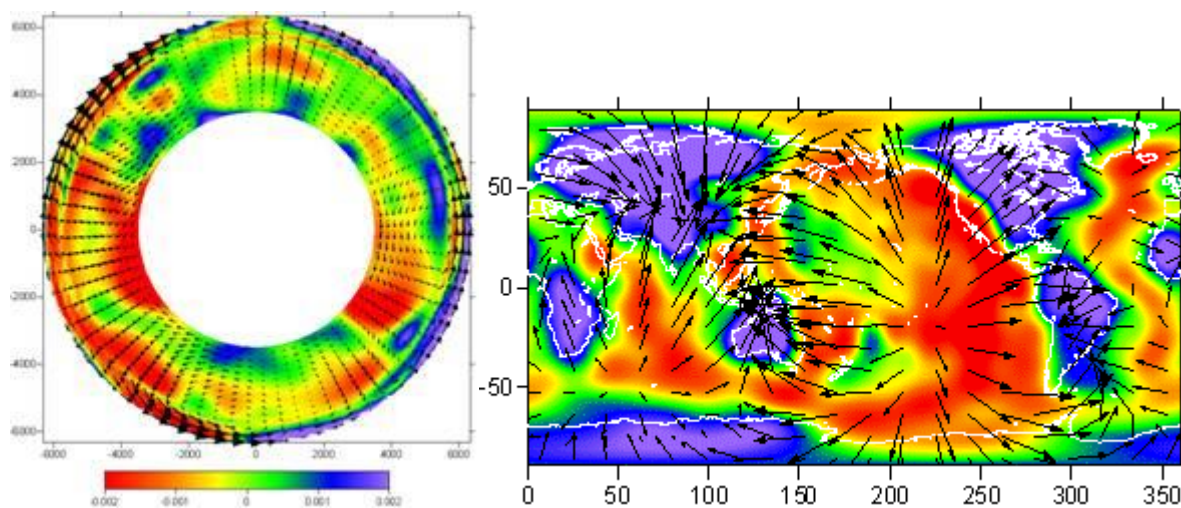


Рис.1. Латеральные вариации плотности (градации цвета) и скорости мантийных течений (стрелки), рассчитанные по данным сейсмической томографии.

А – сечение мантии по долготе 30°; Б – сечение на глубине 150 км.

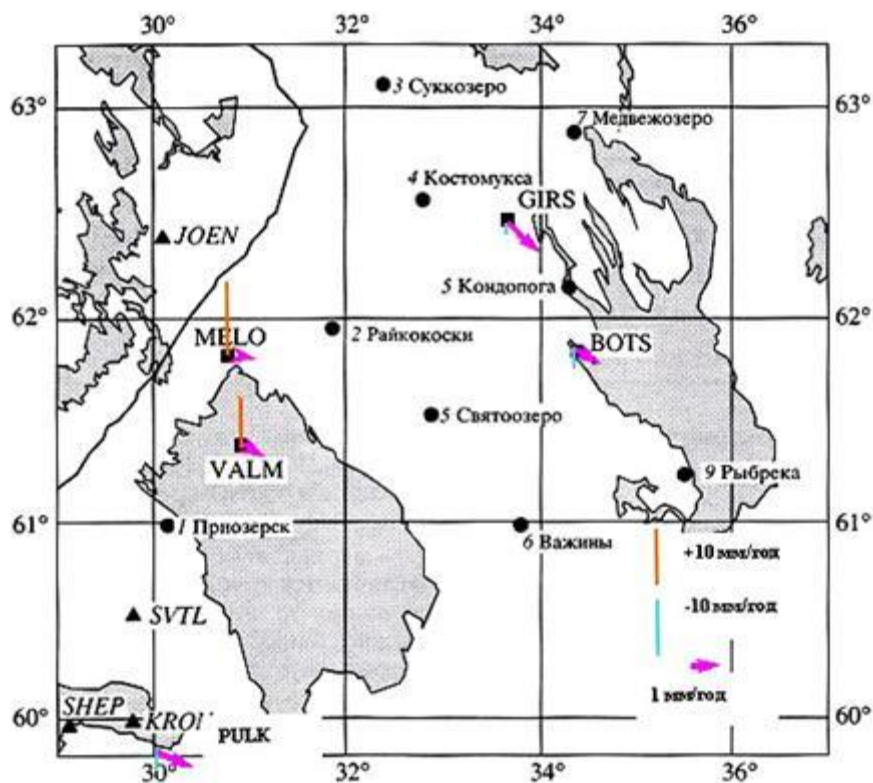


Рис.2. Вектора скоростей горизонтальных и вертикальных перемещений пунктов GPS Балтийско-Ладожско-Онежского региона относительно пункта JOEN, принятого за неподвижный

2. Определены амплитуды и скорости современных движений в разных системах координат и параметры деформаций за различные временные интервалы для различных регионов и локальных структур европейской и азиатской частей Российской Федерации. Скорости горизонтальных перемещений на Европейской части РФ составляют 2-3 см/год в северо-восточном направлении (в системе координат ITRF2000). Скорости движений и их направление для одних пунктов достаточно стабильны во времени, для других изменяются в зависимости от периода осреднения. Оценки показывают, что в локальной местной системе координат скорости горизонтальных движений составляют обычно несколько миллиметров в год и редко превышают 1 см/год. Выявлено несоответствие в скоростях вертикальных движений, определенных по многолетним данным точного нивелирования (до 2 мм в год) и GPS измерений (до 18 мм в год), для Ладожского региона.

#### [Контактная информация](#)

Получены новые определения палеонапряженности в интервале 80–100 млн. лет тому назад. По Мировой Базе данных проанализированы результаты определений палеонапряженности в интервале 60–150 млн. лет тому назад, внутри которого имеется хорошо известный меловой суперхрон прямой полярности CNS, отмечено отсутствие значимых изменений в поведении величины VDM как при входе в CNS, так и при выходе из него.

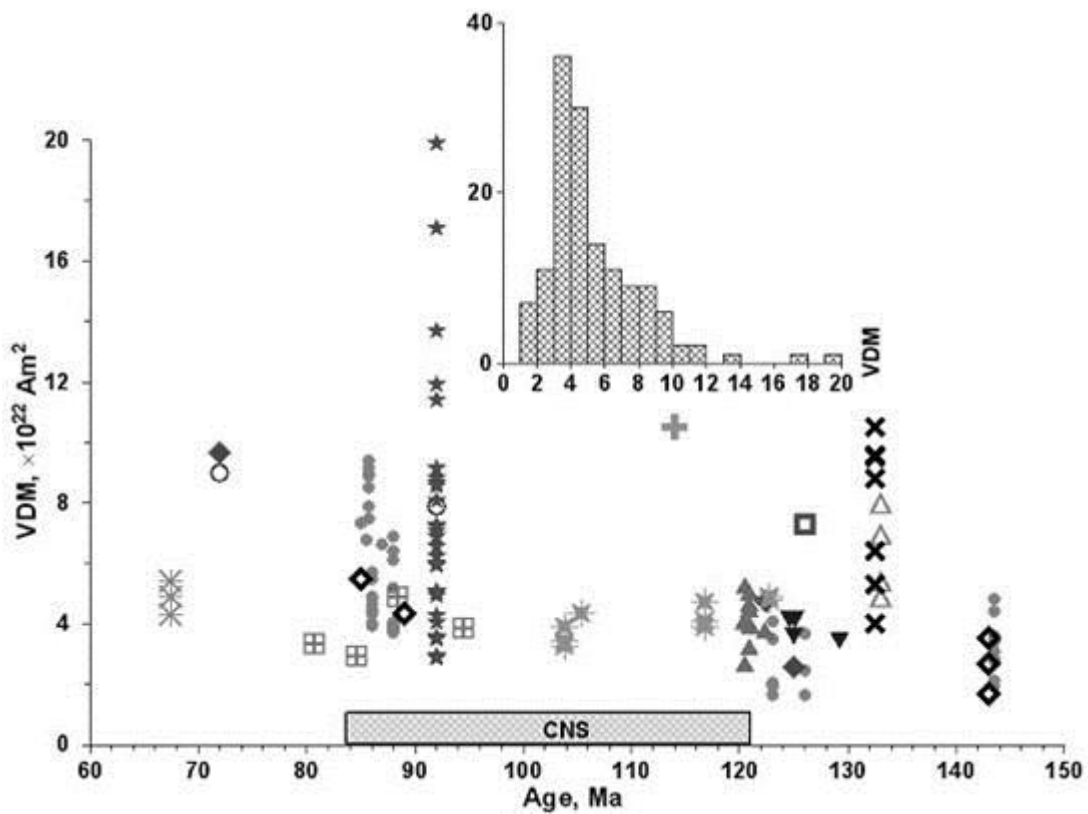


Рис. 3. Результаты определения палеонапряженности в интервале 60–150 млн. лет тому назад.

Развита теория гигантского смещения петель гистерезиса, наблюдаемого в антиферромагнитных материалах, содержащих ферромагнитные наночастицы. (ГО «Борок», ОБ-1)

#### Контактная информация

3. Выполнено детальное исследование истории развития прогибов земной коры в Арктике. Северо-Чукотский прогиб, заполненный 22 км осадков, является одним из самых глубоких осадочных бассейнов на Земле. Погружение коры началось в прогибе 380 млн. лет назад, но основная масса осадков накопилась в нем за последние 130 млн. лет (отложения К 1 br - al и более молодые осадки на рис. 1). Это исключает существование океанической коры в прогибе и указывает на то, что он подстилается корой континентального типа. На нескольких этапах в прогибе происходило резкое ускорение погружения, обусловленное инфильтрацией в нижнюю кору активного флюида из небольших мантийных плюмов. В те же эпохи наблюдалось формирование крутых изгибов кристаллической части коры, хорошо видно на рис. 4 и свидетельствующее о резком размягчении литосферы при инфильтрации в нее флюида. Данные особенности погружения указывают на то, что Северо-Чукотский прогиб является близким аналогом других сверхглубоких нефтегазоносных бассейнов, Прикаспийского, Южно-Каспийского и Восточно-Баренцевского. Поэтому, с большой вероятностью, Северо-Чукотский прогиб также представляет собой крупный нефтегазоносный бассейн. (член-корреспондент РАН Е.В. Артюшков)

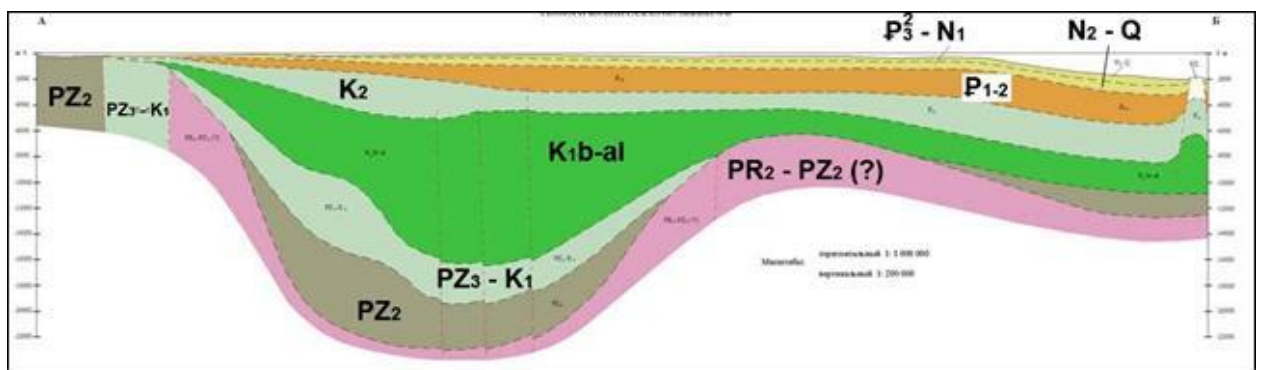
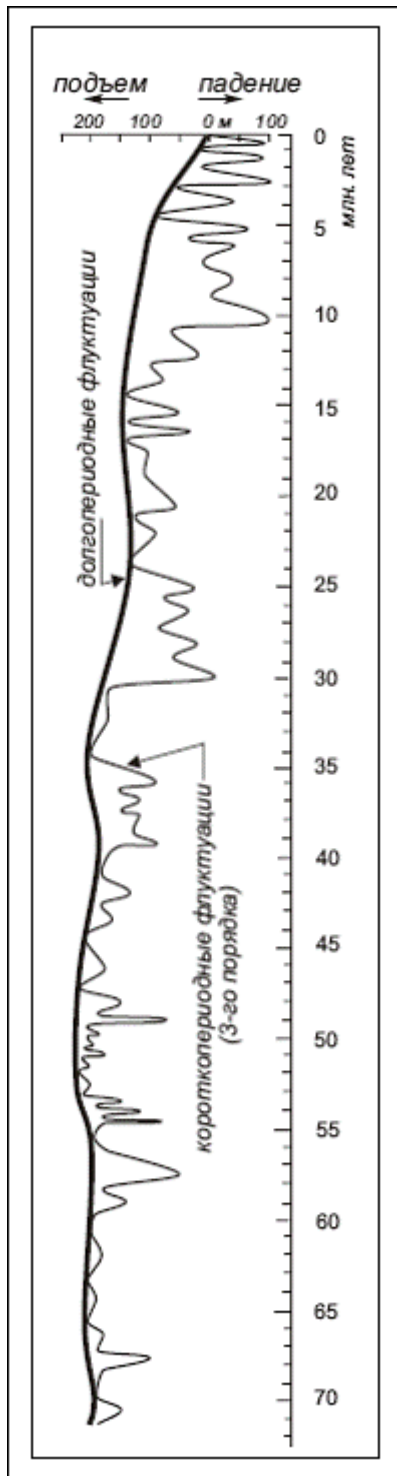


Рис. 4. Субмеридиональный разрез через осадочный чехол Северо-Чукотского прогиба (с изменениями по Государственной геологической карте Российской Федерации, 2005).



В последние 540 млн. лет в нефтегазоносных бассейнах часто происходили изменения глубины воды с амплитудами до 100-200 м за времена 1-3 млн. лет. С ними было связано образование многочисленных линз песка и турбидитов – неструктурных ловушек, содержащих крупные запасы нефти и газа. Подавляющее большинство исследователей, следуя П. Вейлу, объясняет такие изменения глубины воды флуктуациями уровня Мирового океана (например, рис. 1). Анализ геологических данных об истории развития осадконакопления в крайне мелководных условиях (? 10 м) на Восточно-Европейской платформе и в Восточной Сибири показал, что для значительной части палеозойской эры эти представления неприменимы. Оказалось, что 280-320 млн. лет назад и 415-490 млн. лет назад флуктуации уровня океана продолжительностью 1-3 млн. лет в действительности не превышали нескольких десятков метров. В эти эпохи быстрые изменения глубины моря были обусловлены поднятиями и погружениями земной коры в платформенных областях, ранее считавшихся "спокойными" в тектоническом отношении. Полученный результат создает основу для повышения надежности поиска месторождений нефти и газа в неструктурных ловушках. (член-корреспондент РАН Е.В. Артюшков, к. г.-м. н. П.А. Чехович)

Рис. 5. Флуктуации уровня океана, предполагаемые для последних 67 млн. лет многими исследователями (например, Naq et al., Science, 1987, v. 235, p. 1156–1167).

## Изучение внутреннего строения Земли

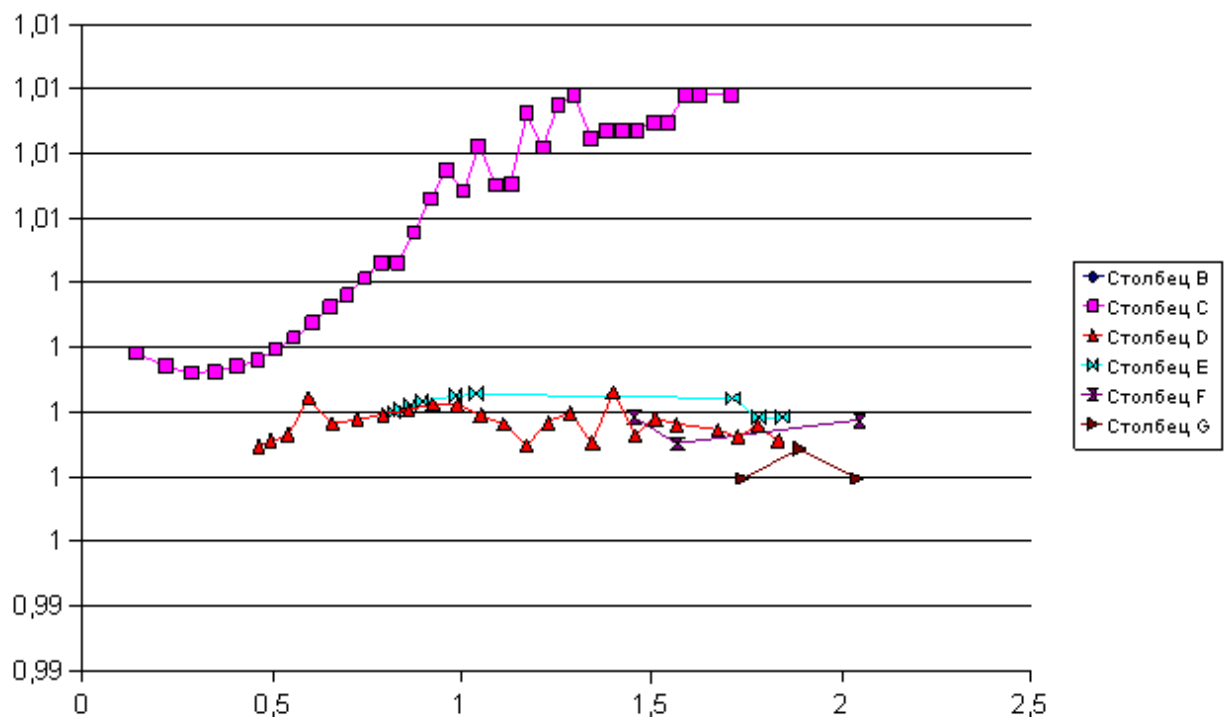
1. Численным моделированием обнаружено запаздывание вертикальной составляющей (SV) дифрагированной на границе ядро-мантия поперечной волны относительно горизонтальной (SH) составляющей. В латерально-неоднородной изотропной среде запаздывание вызвано тем, что SV в отличие от SH сильно затухает на высокоскоростных путях. Поэтому во времени пробега SV доминирует эффект распространения на низкоскоростных путях. В настоящее время этот эффект ошибочно интерпретируется как свидетельство сейсмической анизотропии слоя D” в подошве мантии.

2. С помощью новых сейсмических методов исследована глубинная структура кратонов южной Африки. Обнаружено сильное затухание поперечных волн и низкоскоростная зона на относительно небольшой глубине, характерные для областей термо-химической активизации верхней мантии. Этот результат позволяет объяснить недавнее поднятие южной Африки на высоту около 1.5 км.

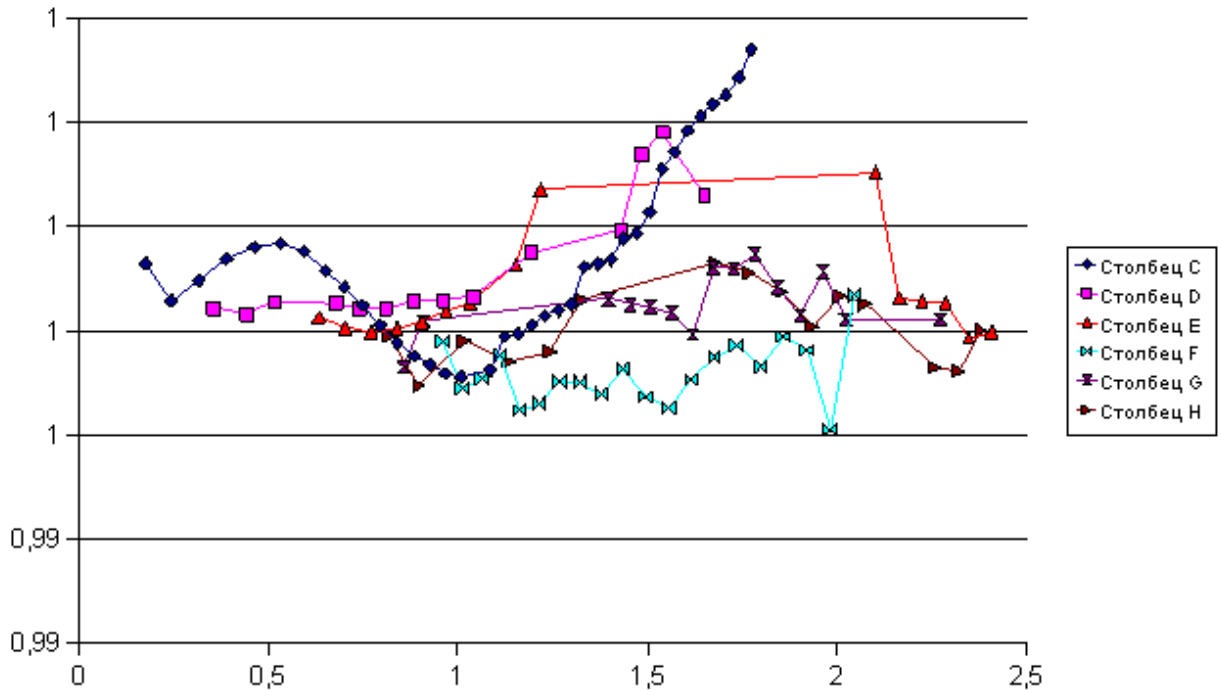
### Контактная информация

3. По астрометрическим, приливным данным и данным о периодах собственных колебаний Земли построены уточненные реологические модели нижней мантии в диапазоне периодов колебаний от одной секунды до четырнадцати месяцев. Значительное уточнение реологических моделей в диапазоне периодов от одного часа до 14 месяцев было достигнуто за счет анализа функциональных производных от наблюдаемых значений амплитуд и фаз вынужденной нутации, а также периода и декремента затухания основного сфероидального колебания  $oS_2$  по значениям параметров добротности мантии на разных глубинах. Было показано, что нормированные на единицу значения этих производных очень близки (различаются примерно на 2-5 %). Это позволило свести решение двумерной обратной задачи (определения параметров добротности, как функций частоты колебаний и глубины сферического слоя) к решению одномерной задачи (определения усредненных по глубине параметров механической добротности нижней мантии, как функции одной только частоты). (Молоденский С.М.)

**Рис. 1. Отношения теоретических и наблюдаемых периодов крутильных колебаний Земли. 1, 2,...6 - осн**



**Рис.2. Отношения теоретических и наблюдаемых периодов сфероидальных колебаний Земли. 1, 2,...6**



На рис. 1 и 2 для построенных нами моделей представлены отношения теоретических и наблюдаемых периодов наиболее точно измеренных сфероидальных и крутильных собственных колебаний Земли в диапазоне частот колебаний от 0.16 до 2.5 рад/мин. Как видно из рисунков, для крутильных колебаний наибольшее различие не превосходит 0.2%, а для сфероидальных -0.3%. Относительную точность определения параметров добротности нижней мантии в диапазоне периодов колебаний от 1 с до 14 мес. удалось повысить от 30-50% до ~ 10-15%.

#### [Контактная информация](#)

4. Вопрос о релаксации модуля сдвига под упругой литосферой Марса впервые был подвергнут детальному теоретическому исследованию исходя из данных о гравитационном поле и топографии планеты. Оказалось, что по мере уменьшения модуля сдвига подлитосферной мантии, форма гидростатически равновесной границы ядро-мантия (которая представляет собой эллипсоид вращения) постепенно изменяется и принимает форму трехосного эллипсоида для второй гармоники, что существенно влияет на амплитуды спектра нутаций. Эффект от нагрузки увеличивается при уменьшении модуля сдвига в 10 раз, при этом эффект трехосности достигает максимума. По мере уменьшения модуля сдвига до нуля, сжатие границы ядро-мантия приближается к своему гидростатически равновесному значению. Таким образом после предстоящих измерений амплитуд нутации можно будет судить о степени релаксации модуля сдвига мантии Марса под его крупнейшей структурой Фарсида.

#### [Контактная информация](#)



## Сейсмичность, оценка рисков природных и техногенных катастроф

1. В результате лабораторного моделирования сейсмического режима выявлены закономерности возбуждения и релаксации процесса разрушения в горных породах в зависимости от скорости деформирования и уровня действующих напряжений. При больших скоростях генерируется процесс, схожий с афтершоковыми последовательностями, при меньших – с сейсмическими роями. Аналогичные закономерности обнаружены в натурных условиях.

### Контактная информация

Развиты тектонофизические представления о природе сложных трехдипольных NDC (non double couple) очагов землетрясений, а также особенности их формирования на фоне сеймотектонических деформаций, реконструируемых в областях активных геодинамических режимов. Выдвинута гипотеза о связи NDC-источников с эффектами самоорганизации геофизической среды (SOC – self-organized criticality), которые проявляются в одновременной подвижке по нескольким разрывам.

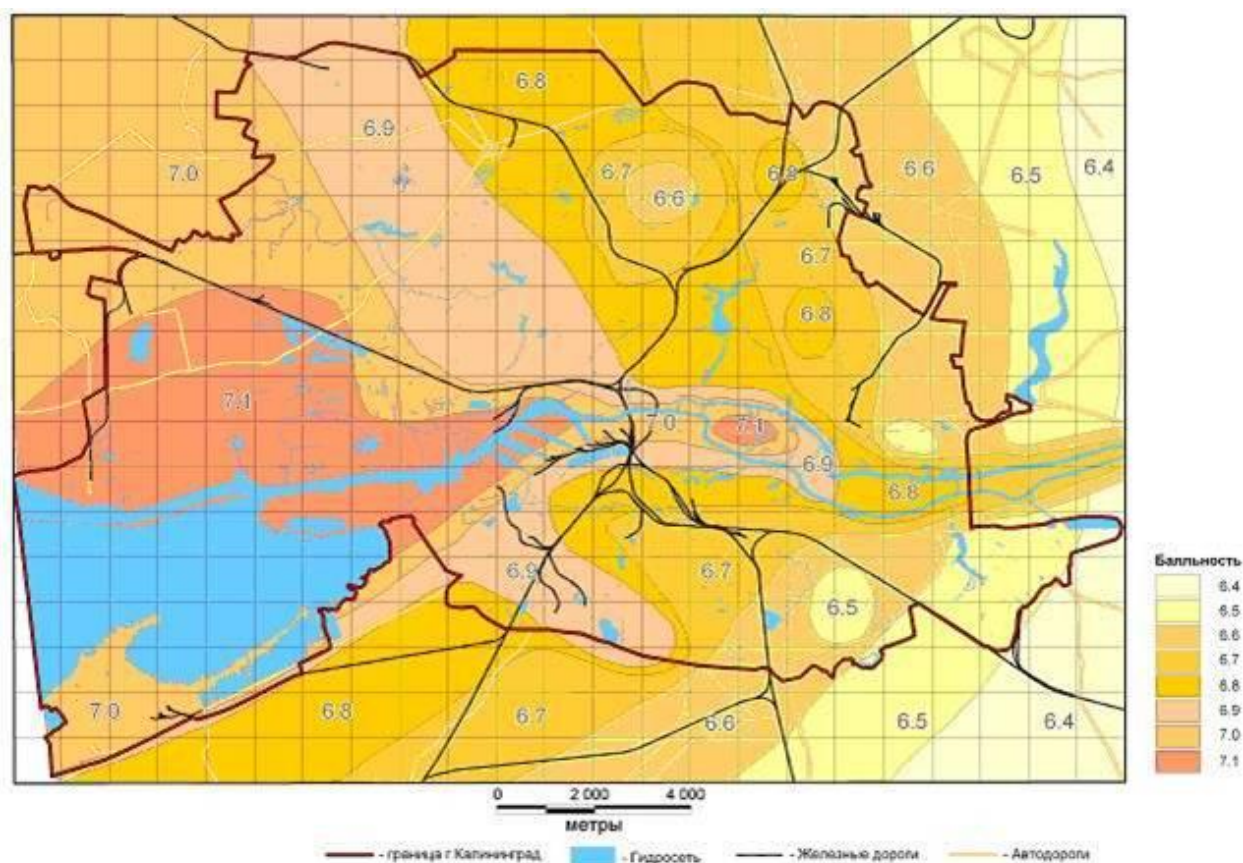
Изучены проявления современных и древних землетрясений на территории Горного Алтая. Получены новые материалы по геодинамической позиции и механизме очага Олюторского землетрясения 2006 г. Проведен ретроспективный анализ сейсмодислокаций Могодского землетрясения 1967 г. с применением новых методик. Полученные материалы о строении очаговых зон крупнейших землетрясений последних десятилетий представляют надежную основу для разработки методологии выделения потенциальных очагов землетрясений.

### Контактная информация

2. Сформулирован «Парадокс малых скоростей современных горизонтальных деформаций земной поверхности», когда по данным GPS измерений среднегодовые скорости относительных деформаций составляют величины  $10^{-9}$  –  $10^{-10}$  1/год, в то время как по данным наземных геодезических и деформографических наблюдений, скорости современных горизонтальных деформаций земной поверхности имеют порядок  $10^{-5}$  –  $10^{-6}$  в год. Объяснение заключается в учете современной аномальной геодинамики разломных зон, характеризующейся высокой пространственной локализацией (0.1–1.0 км), короткопериодичностью (0.1 – 1.0 год) и знакопеременностью процессов. (доктор физ.-мат. наук Ю.О.Кузьмин)

3. Впервые выполнены оценки сейсмической опасности и сейсмических воздействий на территории г. Калининграда на основе комплекса полевых и камеральных исследований. Проведены высокоточные изыскания по сейсмическому микрорайонированию. Определены частотные характеристики сейсмических колебаний грунтовых толщ в разных районах г. Калининграда. Построен набор карт сейсмического микрорайонирования территории города и проведен расчет сейсмических воздействий с учетом грунтовых условий (**рис.1**). Оказалось, что в пределах г.Калининград местами могут ожидать с вероятностью превышения 1% за 50 лет максимальные сотрясения 7 баллов. На карте ОСР-97 эта территория была обозначена как асейсмичная.

### Контактная информация



**Рис.1.** Карта сейсмического микрорайонирования г.Калининграда с вероятностью превышения указанной балльности 1 % за 50 лет.

Разработан комплекс методов исследования оползневых процессов, включающий геодезические методы (в том числе GPS -наблюдения), сейсморазведку на поперечных волнах и разноазимутальные сейсмические наблюдения, скважинные сейсморазведочные наблюдения, инклинометрические мониторинговые измерения. Методика внедрена при наблюдениях на оползнях в районе Коломенского и Воробьевых гор. (А.А.Алёшин)

#### [Контактная информация](#)

Проведена теоретическая и экспериментальная проработка модуляционного метода измерения наклонов и микроускорений. Проводились работы по изучению оползневых процессов с помощью созданных в ИФЗ РАН скважинных инклинометров на многих строительных объектах г. Москвы. В результате проведенных работ были выявлены ослабленные зоны земной коры; модифицированы новые методы гравео-деформационного мониторинга (градиентометрия, высокоточная скважинная инклинометрия, микронивелирование) (к.ф.-м.н. В.Б.Дубовской, А.В.Волков)

Разработана общая методика анализа вариаций параметров мультифрактальных спектров сингулярности геофизических шумов на группе станций наблюдений, включающей в себя оценки вариаций этих параметров в скользящем временном окне, их временное и пространственное усреднение, вычисление средних значений по кластерам станций, а также исследование изменения эффектов когерентного поведения этих средних значений. Выявлены закономерности изменения ширины носителя спектра сингулярности и обобщенного показателя Херста поля низкочастотных микросейсм в Японии за период с начала 1997 г. по ноябрь 2008 г., которые интерпретируются как увеличение синхронизации микросейсмических шумов на Японских островах после землетрясения 25.09.2003. Делается предположение, что событие на Хоккайдо может быть форшоком еще более сильного землетрясения, готовящегося в районе Японских островов.

#### [Контактная информация](#)



## Изучение атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли

Обнаружена неустойчивость ночной E области ионосферы при распространении атмосферных внутренних волн. Неустойчивость соответствует условиям формирования спорадических слоев E и возникновению квазипериодических радиоотражений.

### Контактная информация

Введение в геофизику нового набора волновых индексов геомагнитной активности, характеризующих уровень УНЧ турбулентности в околоземной среде, позволило разработать статистические модели для описания и предсказания интенсивности потоков релятивистских электронов в районе геостационарной орбиты, потенциально опасных для функционирования электроники космических аппаратов. (д.ф.-м.н. В.А.Пилипенко)

Развита нелинейная теория так называемых “магнитных дыр” - глубоких провалов внешнего магнитного поля в околоземной космической плазме. Показано, что они могут являться результатом нелинейной релаксации диамагнитной (зеркальной) неустойчивости, приводящей к образованию стационарных солитонов и кноидальных волн. (доктор физ.-мат. наук О.А.Похотелов)

Предложен новый механизм генерации зональных ветров в атмосферах планет. Модель основана на параметрической генерации конвективных ячеек волнами Россби конечной амплитуды. Исследованы слаботурбулентные спектры волн Россби. Результаты теоретических исследований находятся в хорошем соответствии с данными микроволнового спутникового мониторинга земной атмосферы. (доктор физ.-мат. наук О.А.Похотелов, доктор физ.-мат. наук О.Г.Онищенко)

Предложена и реализована методика измерения частоты образования аэроэлектрических структур в пограничном слое атмосферы на основе разнесенного приема вариаций электрического поля. Обнаружены одновременные аэроэлектрические и температурные когерентные структуры, сопровождаемые короткопериодными пульсациями напряженности поля и температуры воздуха в приземном слое. Показано, что частота образования аэроэлектрических структур растет с ростом интенсивности турбулентной конвекции, но рост этот замедляется с падением влажности воздуха (Рис.1). Полученные результаты дают возможность использования простых дистанционных измерений для совершенствования прогноза и изучения электрического состояния приземной атмосферы.

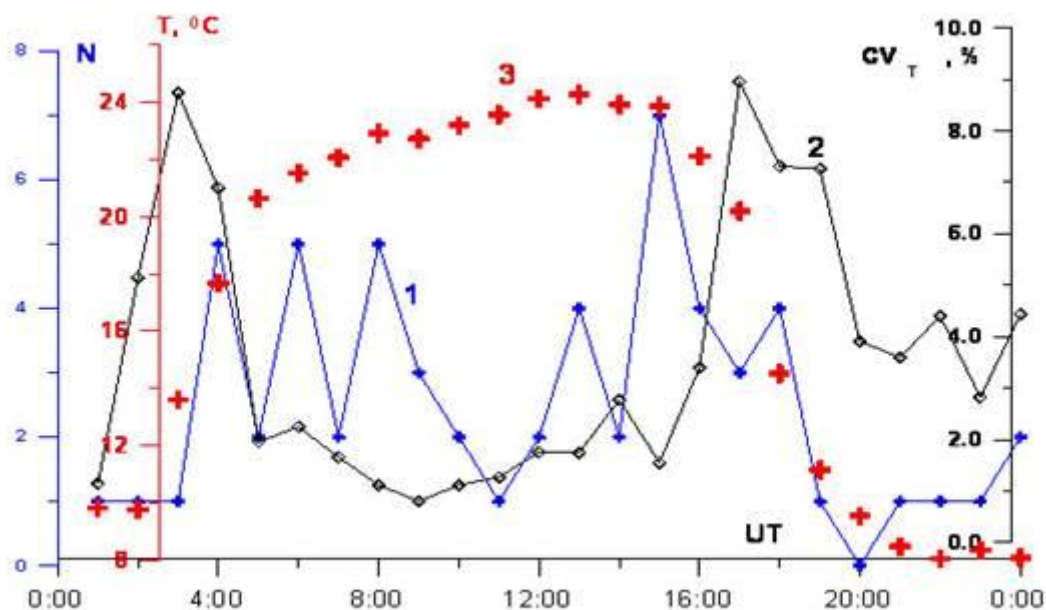


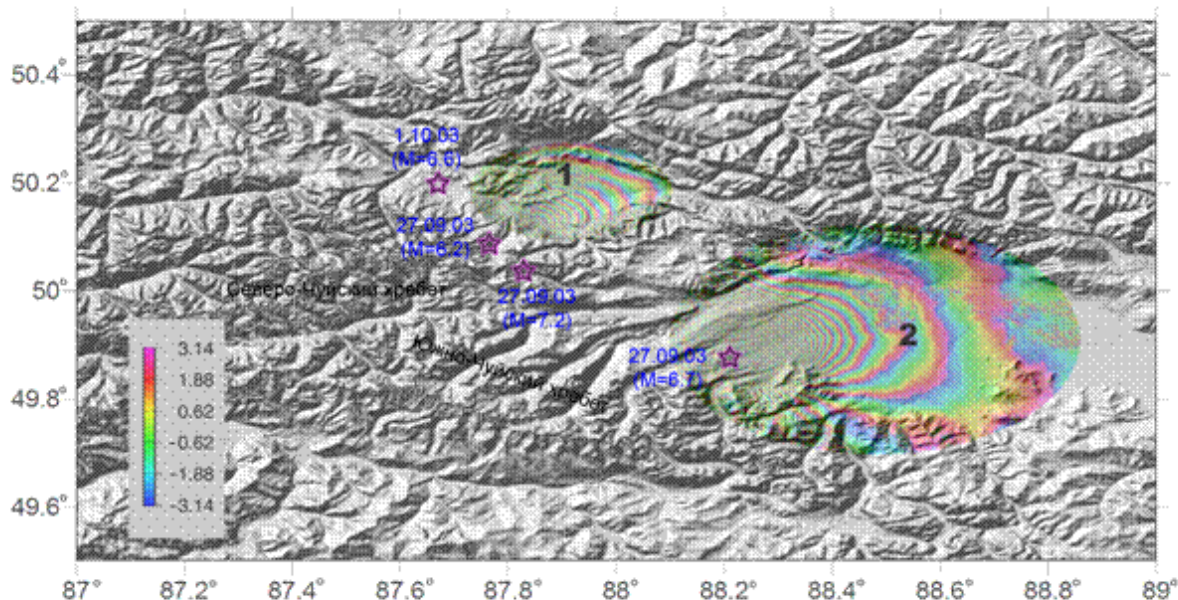
Рис.1. Вариации количества аэрозлектрических структур за час (1), коэффициент вариации температуры за час (2), среднечасовые значения температуры приземного слоя за час (3) по данным обсерватории “Борок” 10 июля 2008 года. Коэффициент корреляции количества структур за час и среднечасовых значений температуры равен 0.58

**(ГО «Борок», ОБ-3)**

[Контактная информация](#)

Построены решения ряда классических, основополагающих задач плоской упругости в конечной области (прямоугольнике). Решения были получены на основе развитого аппарата преобразования Бореля на римановой поверхности логарифмического типа. Впервые получено решение для полосы с разрезом, расположенным перпендикулярно продольным сторонам полосы. Это решение содержит в явном виде очень важный параметр – расстояние от вершины трещины до границы области. Намечены решения для трещин произвольной ориентации и формы, в том числе в канонических областях типа трапеции, параллелограмма и др. Полученные решения использованы в собственных численных алгоритмах, предназначенных для моделирования НДС в окрестности сингулярных точек. (М.Д.Коваленко)

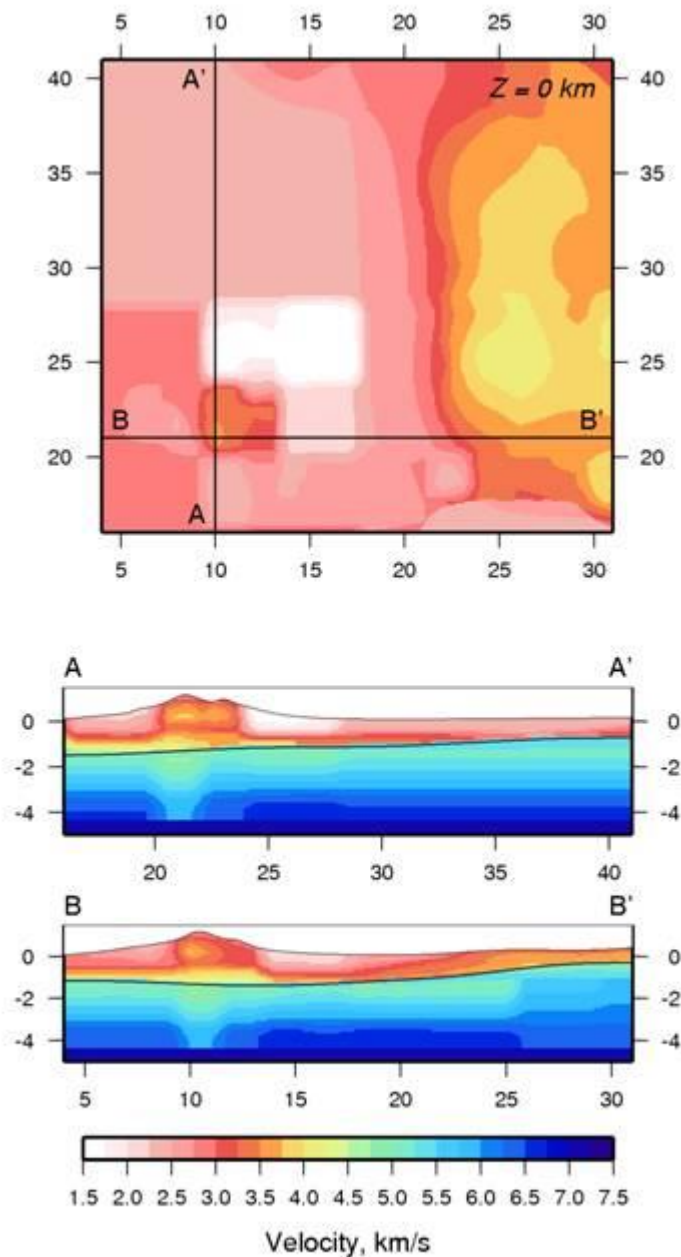
### Контактная информация



*Рис. 1. Интерферограмма, отражающая косейсмические смещения земной поверхности в очаговой зоне Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003. Интерферограмма*

Разработан и реализован новый метод комплексной инверсии данных интерферометрии и геодезии, который позволяет существенно повысить точность и устойчивость решения обратной задачи об определении положения поверхности разрыва и вектора смещений на ней. С использованием этого метода, на основе данных интерферометрии и GPS, а также сейсмологии и сейсмотектоники построена новая модель поверхности разрыва Алтайского (Чуйского, 27.09.2003) землетрясения и оценены направления и амплитуды векторов смещений на отдельных ее участках. Модель хорошо согласуется со всем комплексом имеющихся натуральных данных, включая результаты полевых наблюдений и региональную геодинамику. Построение детальной модели плоскости разрыва и определение векторов смещений важно для оценки изменений региональных полей напряжений в результате землетрясений и, в конечном счете, для прогноза областей будущих сейсмических событий.

### Контактная информация



Построена скоростная модель строения верхней части (0-4,5 км) земной коры в районе вулкана Везувий. Модель создана по данным, полученным в ходе проекта TOMOVES с использованием оригинального алгоритма инверсии данных активной сейсмической томографии, основанного на принципе неоднородной параметризации среды: в области высокой плотности сейсмических лучей непосредственно под вулканическим конусом детальность модели составляет 400-500 м и уменьшается на флангах модели по мере уменьшения плотности лучей. Обнаружена высокоскоростная аномалия вблизи осевой зоны вулкана на глубинах 0-3 км, возможно связанная с магмой, застывшей в подводящих каналах, низкоскоростные аномалии соответствующие рыхлым вулканическим отложениям на склонах вулкана, а также низкоскоростная аномалия на глубинах 3-4,5 км вблизи осевой, возможно связанная с магматической камерой.

#### [Контактная информация](#)

## **Изучение гравитационного поля Земли**

В результате выполненной аэрогравиметрической съемки островов архипелага Новая Земля получена региональная гравиметрическая карта масштаба 1:200 000 на площади более 60 000 квадратных километров. Эта карта пригодна для проведения интерпретации полученных результатов. После выполнения съемки всего архипелага и выполнения интерпретации можно надеяться на получении ответа на вопрос о нарушении теории изостазии на этом районе арктического бассейна и появится возможность уточнить гипотезы о геологической истории возникновения архипелага.

### **Контактная информация**

Разработана и создана модель малогабаритного трехкоординатного сейсмоакселерометра для измерения квазистатических и переменных ускорений в широком динамическом диапазоне (более 160 дБ – от 10<sup>-7</sup> g до 25 g ). Разработана технология изготовления двухкоординатного чувствительного элемента акселерометра. Создание на основе разработанной модели сейсмоакселерометра позволяет решать большой круг фундаментальных и прикладных задач геофизики, в особенности при скважинных наблюдениях, а также участвовать в космических проектах при исследованиях планет земной группы (Фобос-грунт, миссия Met - Net –создание сети автономных станций на поверхности Марса).

### **Контактная информация**

Предложены методы выявления потенциально опасных зон на инженерных сооружениях для решения задачи своевременного определения тенденций развития деформационных процессов. Обоснованы требования к информационной измерительной системе и составу аппаратуры для решения задачи выявления потенциально опасных зон в инженерных сооружениях. Предложены методики совместной обработки многомерных длительных рядов, включающих как информацию о состоянии деформационных процессов в анализируемых элементах конструкций, так и информацию о вариациях метеопараметров для получения формализованных критериев определения начальной стадии развития аномальных деформационных процессов, которые могут привести к разрушениям. Проведена проверка достоверности разработанных методов на конкретных сооружениях.

### **Контактная информация**



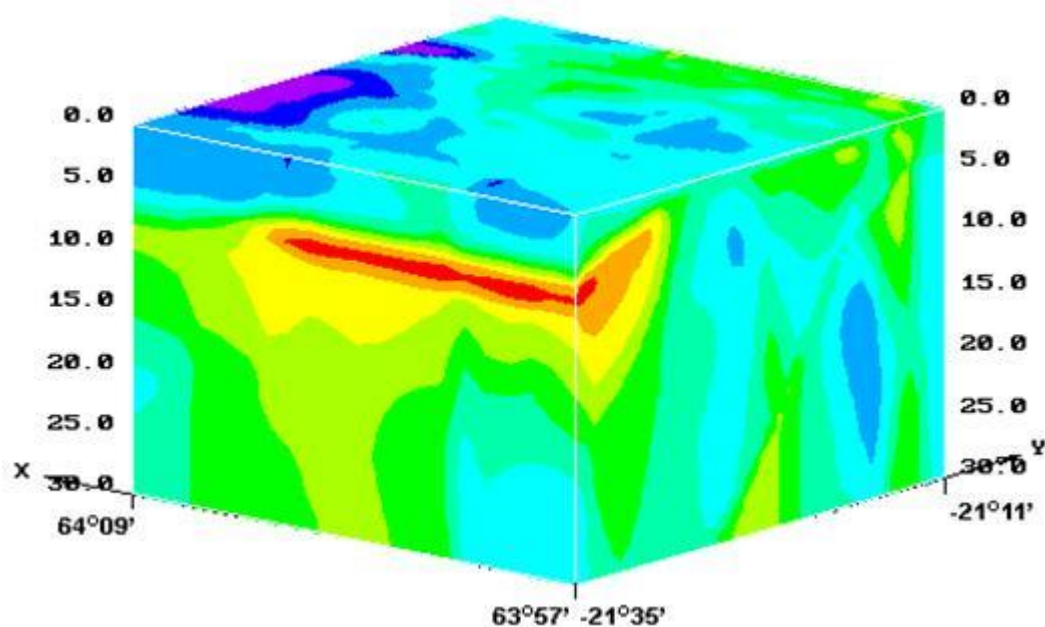


Рис. 2. Объемная модель сопротивления геотермальной зоны Хенгилл (Исландия).

По магнитотеллурическим данным построена трехмерная модель сопротивления геотермальной зоны Хенгилл (Исландия) (рис. 2). Ее анализ позволяет сделать вывод о наличии в юго-западном секторе хорошо проводящего слоя на глубине примерно 10 км и мощностью примерно 5 км. Это согласуется с гипотезой о “тонкой” коре Исландии, согласно которой частично расплавленный базальт (с температурой примерно 1100 градусов С ?) поднимается из мантии и аккумулируется в низах коры на глубинах 10-15 км.

[Контактная информация](#)

### Лаборатория методологии интерпретации электромагнитных данных

Обоснована возможность косвенной оценки температуры земных недр на глубинах, превосходящих глубины пробуренных скважин, с помощью бесконтактного электромагнитного «геотермометра». Новый метод тестирован на данных, измеренных на Бишкекском полигоне (северный Тянь Шань) (Приложение 1(а): рис. 1). Полученные результаты говорят о том, что оценки температуры, сделанные таким образом, оказываются существенно (в 1.5-2 раза) точнее тех, которые можно получить с помощью обычной экстраполяции геотерм на большие глубины.

Рис. 1. Термограммы (сплошные линии) и прогнозные температурные профили (линии с треугольниками), полученные в районе северного Тянь-Шаня.

### [Контактная информация](#)

