

Министерство науки и высшего образования РФ  
Российский фонд фундаментальных исследований

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР  
имени академика М. А. Садовского  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

# **ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГЕОСИСТЕМАХ**

Тезисы VI Международной конференции  
(г. Москва, 21–24 июня 2022 г.)

Москва – 2022

# Глобальный сейсмический шум и глобальная сейсмическая опасность

---

Любушин А.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: lyubushin@yandex.ru

Исследован глобальный сейсмический шум, непрерывно регистрируемый на сети 229 широкополосных сейсмических станций, расположенных по всему земному шару за 25 лет, с начала 1997 года до конца 2021 года. Для исследования свойств шума использовался набор статистик, оцениваемых ежедневно: ширина носителя мультифрактального спектра сингулярности  $D_s$ , минимальная энтропия квадратов вейвлет-коэффициентов  $E_n$ , вейвлетный индекс Донохо-Джонстона  $\Gamma$ . Показано, что временные точки локальных экстремумов средних значений анализируемых свойств шума (минимумов для  $D_s$  и  $\Gamma$  и максимумов для  $E_n$ ) имеют тенденцию возникать перед сильными землетрясениями. Определен временной интервал с середины 2002 г. до середины 2003 г., когда тренд снижения средней когерентности свойств шума во вспомогательной сети 50 опорных точек сменился на рост. Наряду с ростом средней когерентности, наблюдается увеличение радиуса пространственных максимальных когерентностей свойств шума. Обе эти тенденции сохраняются до конца 2021 г., что интерпретируется как общий признак роста степени критичности состояния планеты и, как следствие, роста глобальной сейсмической опасности. После двух близких по времени мега-землетрясений: 27.02.2010,  $M=8.8$  в Чили и 11.03.2011,  $M=9.1$  в Японии произошло взрывное увеличение пространственных масштабов сильной когерентности параметров шума, что также является признаком роста критического состояния. Исследован отклик свойств сейсмического шума на вариации длины суток (LOD). В качестве меры отклика, распределенной по поверхности Земли, использовался максимум спектра когерентности между LOD и ежедневными значениями свойств шума в сети опорных точек, оцениваемый в скользящем временном окне длиной 1 год. Оценка корреляционной функции между средними значениями отклика на LOD и логарифмом выделившейся сейсмической энергии в скользящем временном окне длиной 1 год указывает на задержку выделения энергии по отношению к максимумам отклика свойств шума на LOD со временем запаздывания около 500 суток. В связи с этим результатом дополнительную интригу вносит экстремальное увеличение среднего значения отклика на LOD в 2021 году.

Литература.

Lyubushin A. (2020) Global Seismic Noise Entropy // *Frontiers in Earth Science*, 8:611663. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.611663>

Lyubushin A. (2021) Low-Frequency Seismic Noise Properties in the Japanese Islands // *Entropy* 2021, 23, 474. <https://doi.org/10.3390/e23040474>

Lyubushin, A. (2021) Global Seismic Noise Wavelet-based Measure of Nonstationarity. *Pure and Applied Geophysics*, 2021, vol.178, 3397–3413. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02850-8>

# Твёрдый лунный прилив – причина тектонического расслоения пород земной корово-мантийной оболочки и триггер большинства землетрясений

---

Ильченко В.Л.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

e-mail: vadim@geoksc.apatity.ru

1. Волна твёрдого лунного прилива дважды в сутки (уже на протяжении  $\sim 4.5$  млрд лет) запускает механизм тектонического расслоения, который работает как регулярная колебательная система стоячих волн в режиме затухания, приводящая к развитию в породной толще системы узловых точек стоячей волны – концентраторов избыточно высоких напряжений (потенциально опасных глубинных областей развития тектонических нарушений).

2. Механизм тектонического расслоения внешней оболочки Земли создает предпосылки для создания ритмично построенной системы породных горизонтов с избыточно высоким напряженным состоянием – потенциальных тектонических границ (в соответствии с пространственным распределением узловых точек стоячей волны).

3. Механизм тектонического расслоения можно использовать для расчета глубины залегания любых тектонических границ с построением моделей расслоения объектов земной коры (в составе твердой оболочки Земли). Пример – модель расслоения земной коры Печенгского блока как колебательной системы (совпадение границ модели с динамическим разрезом Кольской сверхглубокой скважины – 74 %).

4. Постулат о принципе эквивалентности гравитирующих масс (ЭГМ): масса источника гравитационного возмущения эквивалентна (равна) массе вещества в составе области возмущения. На основании принципа ЭГМ, приливное влияние лунной гравитации на внешнюю оболочку Земли (с её последующим ритмичным тектоническим расслоением) проникает, в среднем, до глубины  $\sim 1600$  км. Расчеты от этой глубины (в соответствии с механизмом тектонического расслоения), использованные в построении соответственных моделей, показали близкое совпадение расчетных глубин с границами в «классических» моделях строения Земли (построенных на других принципах).

5. Регулярность гравитационного воздействия Луны на внешнюю оболочку Земли (дважды в сутки) до глубин  $\sim 1600$  км (в т.ч. тектоносферу) с развитием в ней границ тектонического расслоения даёт основание для проведения расчётов, связанных со временем накопления в породах избыточно высоких напряжений. Длительность периода накопления определяет степень катастрофического разрушения пород, вызывающего землетрясения соответствующей силы. Пример – ретропрогноз Великого японского землетрясения, сделанный путём отсчёта количества твёрдых лунных приливов с момента предыдущего сильного землетрясения, случившегося примерно в том же месте на 8 лет раньше. Погрешность этого ретропрогноза составляла  $\pm 6$  суток (12 приливов).

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ:** гравитационные возмущения во внешней оболочке Земли, создаваемые лунной массой, являются главным источником энергии в тектоническом расслоении вещества этой оболочки и триггером землетрясений. Статистические закономерности гравитационного воздействия лунной массы на вещество внешней оболочки Земли можно успешно использовать как основу в моделях тектонического расслоения внешней оболочки Земли и предсказаниях землетрясений.

## О возможности прогноза микросейсмической активности на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей

---

**Злобина Т.В.**

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

e-mail: tati.verkholantseva@gmail.com

Промышленная отработка Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) ведется более 85 лет, сейсмологические наблюдения на рудниках месторождения проводятся более 25 лет. За этот период набран огромный фактический материал о микросейсмической активности, пространственно-временных закономерностях, механизмах сейсмических событий, о влияющих факторах. Эта информация позволила произвести расчет зависимостей уровня сейсмической активности от влияющих факторов и выразить это влияние с помощью прогнозируемого параметра  $P(t)$ , характеризующего интенсивность сейсмических процессов. При исследовании такие факторы, как взрывные работы, удаленные землетрясения, ширина и высота камеры, показали свою нестабильность и сложность использования в прогностической модели. Такие факторы, как возраст отработки, количество отработанных пластов, возраст и тип закладочного материала, наоборот продемонстрировали наилучшую корреляцию, что позволило их использовать для прогноза активности процессов разрушения. Выбранный параметр  $P(t)$  рассчитывается для каждой отдельной камеры для определенного года, используя полученные связи. Меньший временной интервал является нецелесообразным для расчета в связи с пластическими свойствами калийных солей (сейсмичность проявляется не сразу, а спустя десятки лет). Таким образом, используя данный параметр на выходе получается карта прогностического параметра, характеризующего активность процессов разрушения подработанного массива через параметры сейсмической активности (плотность выделения сейсмической энергии). Как показывал ретроспективный анализ, есть необходимость сглаживания рассчитанного поля, это связано с небольшими значениями ширины камер по сравнению с размерами всего рудника, с возможной ошибкой в базе горнотехнических данных, с особенностями интерполяции исходных данных. Расчет и сравнение фактических и рассчитанных карт выявили наилучший радиус сглаживания для фильтрации, который составил 750 м. С помощью данной методики был произведен расчет параметра  $P(t)$  для одного из рудников ВКМКС на 2022 год, выделена наиболее опасная территория на руднике, на которой необходимо производить соответствующие меры по снижению уровня активности деформационных процессов. Вся описанная методика прогноза микросейсмичности относится к условиям стандартной отработки калийных солей на ВКМКС и исключает аварийный сценарий разработки месторождения.

# “Веерный” механизм разрушения цельных горных пород – как триггер динамических процессов на сейсмических глубинах в земной коре

---

Тарасов Б.Г.

Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела, Санкт-Петербург, Россия

e-mail: bgtaras@gmail.com

Данный доклад обсуждает суть недавно обнаруженного автором “веерного” механизма разрушения цельных прочных пород магистральными трещинами сдвига в условиях объемного сжатия, соответствующего сейсмическим глубинам в земной коре. Веерный механизм является триггером спонтанного развития таких трещин с высокими скоростями, которые могут превосходить скорость упругих волн. Показано, что наряду с другими типовыми характеристиками он определяет также диапазон глубин сейсмической активности и характер распределения частоты землетрясений с глубиной.

Сформированные этим механизмом магистральные трещины сдвига имеют одинаковую структуру, наблюдаемую как в природных разломах, вызывающих землетрясения и мощные горные удары (shear rupture rockbursts), так и в лабораторных образцах. Структура магистральных сдвиговых трещин представляет собой эшелон трещин отрыва и пластин породы между ними, заполняющих пространство между берегами магистральной трещины. Трещины отрыва и структурные пластины, следующие непрерывно друг за другом, зарождаются и формируются на кончике растущей магистральной трещины. Угол ориентации трещин отрыва и структурных пластин изначально совпадает с направлением действия максимального главного напряжения  $\sigma_1$ . При сдвиге берегов магистральной трещины структурные пластины подвергаются развороту на разные углы в зависимости от величины относительного смещения берегов, играя роль шарниров. Вследствие того, что величина относительного смещения берегов увеличивается с ростом расстояния от кончика магистральной трещины, в голове магистральной трещины образуется веер, состоящий из структурных пластин.

Веерная структура обладает рядом фантастических свойств, главными из которых являются следующие:

- сопротивление сдвигу между берегами магистральной трещины в зоне веера снижается до значений на порядок ниже прочности трения (остаточной прочности);

- веерная структура является мощным природным механизмом, усиливающим действующие в массиве напряжения сдвига в десятки раз на кончике и в зоне веера.

Совокупность этих свойств создает в веерной зоне условие мощного само-дисбаланса, ввиду огромного превосходства сдвиговых напряжений над сопротивлением сдвигу, созданных веером. Это позволяет веерной голове магистральной трещины с легкостью пронизывать цельные породы любой прочности при сдвиговых напряжениях в массиве существенно ниже прочности трения (до десятичного порядка). Важно отметить, что процесс разрушения цельной породы веерным механизмом сопровождается малыми величинами стресс-дропа, типичными для землетрясений, и аномально малой энергоемкостью разрушения с колоссальным выделением свободной упругой энергии. Веерный механизм активизируется только при высоких значениях  $\sigma_3$ , соответствующих глубинам сейсмической активности в земной коре. Причины этого обсуждаются в докладе.

Для создания первичной веерной структуры в цельных породах необходимы высокие напряжения, которые могут образовываться в массиве локально вблизи существующих разломов в местах напряженных контактов между берегами разлома. После завершения формирования первичного веера в зоне высоких локальных напряжений и создания условия само-дисбаланса в веерной

структуре, веер приобретает возможность динамического перемещения в область низких напряжений в массиве, являясь триггером создания новой магистральной трещины, вызывающей эффект землетрясения или горного удара. Близость новых трещин к существующим разломам создает иллюзию динамического проскальзывания (стик-слип) вдоль разлома. С позиций веерного механизма можно объяснить целый ряд существующих парадоксов и загадочных фактов, связанных с динамическими явлениями в земной коре. Анализ свойств веерного механизма позволяет сделать вывод о том, что он является главным триггером землетрясений и глубинных горных ударов (типа shear rupture rockbursts), т.к. в отличие от стик-слип механизма он может активизироваться при сдвиговых напряжениях в массиве существенно (на порядок) ниже остаточной прочности.

# **Изучение особенностей распространения волновых процессов в горном массиве для обеспечения безопасности охраняемых объектов и устойчивости откосов при ведении взрывных работ на карьерах**

---

**Кутуев В.А., Жариков С.Н.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

e-mail: kutuev88@gmail.com

В настоящее время пока не существует более экономичного способа одновременного разрушения больших объемов горных пород, чем буровзрывные работы. Учитывая, что для поддержания нормального функционирования выстроенных городских агломераций требуется регулярное поглощение ресурсов, то добыча полезных ископаемых в ближайшее время будет проходить примерно в тех же объемах, и скорее всего с незначительными изменениями, связанными с кризисными явлениями различного характера. Поэтому и объемы разрушения горных пород взрывом для выемки и транспортирования на поверхность во времени останутся прежними. Следует заострить внимание на том, что как подземные горные выработки, так и открытые двигаются постепенно от горизонта к горизонту в глубину, а значит, последствия взрывов становятся более опасными, т.к. могут спровоцировать крупные обвалы, оползни и обрушения. Для обеспечения безопасности охраняемых объектов можно выделить три основных критерия, которые существенно ограничивают те или иные решения при производстве технологических взрывов. Это сейсмозрывное воздействие (сейсмика), разлет отдельностей и степень возможного повреждения охраняемого объекта ударной волной. Сейсмика влияет на межблочные подвижки и соответствующим образом на устойчивое состояние грунтов и откосов, а также на здания и сооружения, испытывающие в своем основании гармонические колебания. Не всегда сейсмическое воздействие на устойчивость объекта заметно сразу, но оно всегда приводит к изменению свойств блочной структуры массива горных пород.

Наиболее опасными для любого сооружения являются колебания горного массива, превышающие допустимые значения по критерию устойчивости, поэтому важным вопросом промышленной безопасности является контроль таких колебаний при производстве взрывных работ, которые обеспечили бы сохранность или хотя бы минимальное негативное воздействие на объект при производстве взрывов. Учитывая изложенное, следует отметить актуальность исследований в направлении изучения сейсмических волн, а привязка этих исследований к задачам горной промышленности имеет высокое научно-практическое значение.

Целью работы является изучение особенностей пространственно-временного распространения сейсмозрывных волн от технологических взрывов, используя данные, полученные сейсморегистраторами, установленными на земной поверхности, для повышения уровня безопасности охраняемых объектов, устойчивости откосов и более рационального использования прибортовых запасов месторождений полезных ископаемых, разрабатываемых открытым способом.

Для достижения поставленной цели были решены основные задачи исследования:

- Изучение сейсмического действия технологических взрывов на охраняемые объекты и законтурный массив в различных горно-геологических условиях сложноструктурных месторождений с использованием прямых натуральных измерений.
- Анализ отклонений фактических колебаний массива горных пород от расчётных значений при разных коэффициентах грунтовых условий и установление уточняющих зависимостей для

расчёта допустимых скоростей колебаний на основе физико-механических свойств горных пород при различном структурном ослаблении горного массива.

- Разработка номограммы, позволяющей определять сейсмобезопасные параметры БВР в приконтурной зоне карьера, для обеспечения устойчивости откосов, а также прогнозировать сейсмическое воздействие взрывных работ на охраняемые объекты.

Результаты исследований.

В процессе анализа данных фактических измерений сейсмичности взрывов на различных месторождениях Урала, Сибири и Казахстана за продолжительный период времени установлены средние отклонения фактических колебаний от расчётных значений при различных коэффициентах грунтовых условий. Получены уточняющие зависимости для расчёта допустимых скоростей колебаний массива горных пород.

На основе данных о физико-механических свойствах горных пород и распространении в них сейсмических колебаний при массовых взрывах, построена номограмма для определения ограничений по массе зарядов в ступени замедления, обеспечивающих сейсмобезопасность охраняемых объектов.



## Концентрация масс земной коры перед сильными землетрясениями: прямые и косвенные данные

---

**Кафтан В.И.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: v.kaftan@gcras.ru

Согласно распространенной сегодня в научной среде гипотезе упругой отдачи, как наиболее правдоподобной модели подготовки и механизма сильного землетрясения, главным его источником является накопление упругих деформаций в созревающем сейсмическом очаге. Этому процессу способствует наличие сцепления элементов тектонических сейсмогенерирующих разломов в месте будущего сброса накопленных упругих напряжений. Такой механизм требует накопления масс в области будущего гипоцентра за счет увеличения плотности материала земной коры в данном локальном районе и соответствующего роста ускорения силы тяжести. Сброс упругих напряжений в результате землетрясения способствует разуплотнению объемов корового материала, что должно выражаться в уменьшении силы тяжести в эпицентре после вспарывания земной коры. Это предположение уже начинает проверяться прямыми гравиметрическими наблюдениями за изменениями силы тяжести в сейсмоактивных районах. Процесс уплотнения корового материала сегодня может быть отслежен средствами ГНСС наблюдений. В регионах высокой сейсмической активности, например, таких как западное побережье Северной Америки, Япония и другие, функционируют непрерывно-действующие сети ГНСС геодинамического назначения. Продолжительность наблюдений достигает первых десятилетий. Ежесуточные определения координат осуществляются с субсантиметровой точностью. Таким образом реализуется возможность отслеживания накопления деформаций земной коры на разных стадиях сейсмического цикла. Уже перед многими сильными сейсмическими событиями определены изменения координат пунктов ГНСС, что представляет основу наблюдений за эволюцией деформации в связи с подготовкой произошедших землетрясений. Согласно модели упругой отдачи естественно предположить, что в местах будущих сильных землетрясений накапливаются деформации сжатия, способствующие уплотнению корового материала и накоплению упругой сейсмической энергии. С целью проверки данного предположения проведены специальные эксперименты. Перед десятью сильными землетрясениями США, Японии, Турции и Новой Зеландии, на территориях радиусом порядка ста километров от их эпицентров были определены цифровые модели горизонтальных смещений и деформаций на каждые сутки на протяжении около десятка лет. Графическая визуализация каждой цифровой модели являлась кадром соответствующей анимации, представляющей эволюцию сейсмо-деформационного процесса в связи с разломной тектоникой района. Таким образом оказалось возможным прямое наблюдение за сейсмодформационным процессом перед сильными землетрясениями. Согласно гипотезе Рейда, в местах эпицентров будущих землетрясений должна возникать область минимальных внутренних движений (дефицита смещений) пунктов ГНСС, а на удалениях от будущего эпицентра скорость движений должна быть выше. Это предположение согласуется с областью сейсмического затишья, возникающего перед будущими землетрясениями. Эвристический анализ полученных кинематических визуализаций подтвердил факт образования зон дефицита внутренних смещений перед сильными коровыми землетрясениями во всех имеющихся случаях. Этот результат не противоречит предположению о накоплении масс в гипоцентре будущего сильного землетрясения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что непрерывные ГНСС наблюдения позволяют регистрировать места возникновения будущих сильных землетрясений.

## Селевые отложения южного Прибайкалья (на примере п. Аршан)

---

Юрьев А.А., Рыбченко А.А.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

e-mail: zuzua2016@gmail.com

Цель исследования состояла в изучении селевого потока № 2, 3 от зоны срыва до конца конуса выноса методом аэрофотосъемки с отбором проб заполнителя для гранулометрического и количественного минералогического анализов. Сход нескольких селевых потоков в Южном Прибайкалье (п. Аршан) произошёл на рассвете 28 июня 2014 г. Из пяти образовавшихся детально изучен селевой поток № 2, 3. Селевой поток №2 представлял наибольшую опасность для п. Аршан [4].

Для выполнения аэрофотосъемки использовался квадрокоптер DJI Phantom 4 PRO (БЛА). Данный вид работ позволил точно выделить границы селевой активности, выяснить морфометрические данные селевого бассейна. [1, 2].

Для выполнения гранулометрического анализа и количественного минералогического анализа заполнителя производился отбор проб в конусе выноса, транзитной зоне и зоне срыва селевого потока № 2, 3. Пробы были отобраны из различных микроформ рельефа. Всего было отобрано 62 проб.

Гранулометрический анализ состоял в разделении заполнителя, частиц на фракции по крупности от  $<0,25$  мм. до  $>3$  мм.

Количественный минералогический анализ позволил определить минералы заполнителя при помощи микроскопа с привлечением специального программного обеспечения. Тем самым автору удалось уточнить методику, которая позволила ускорить диагностику обломочной фракции с определением светлоокрашенных и темноокрашенных минералов.

В результате проведенных исследований отмечено, что минеральный состав заполнителя селевого отложения № 2, сформировавшегося на склонах Тункинских Альп, характеризуется содержанием основных породообразующих минералов. Они были принесены из единой области сноса кластического материала. Выявлены аномалии содержания карбонатного заполнителя в пробах № 8 и № 11, что связано с выходами мраморов, разрушенных потоком. Разнородный характер в распределении тяжелых минералов в селевых отложениях сформировался под влиянием различных структурно-динамических особенностей селевого потока.

Гранулометрический анализ позволил выявить динамику распространения заполнителя. От зоны срыва до конца конуса выноса произошло уменьшение размера частиц: 1) в зоне срыва преобладают частицы  $>3.0$  мм, 2) в транзитной зоне - частицы  $0.5-3.0$  мм., 3) в конусе выноса - частицы  $<0.25$  мм. Участки с различной степенью размера частиц в составе заполнителя связаны с изменением энергии в структуре селевого потока. Результаты проведенных работ – составная часть более обширных исследований всей выделенной при помощи квадрокоптера площади селевой активности района п. Аршан для изучения в будущем.

# Интернет-приложение для интерактивной визуализации геофизических данных: подход, архитектура, технологии

---

Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Соловьев А.А., Воробьева Г.Р.

ФГБУН Геофизический центр РАН, Москва, Россия

e-mail: geomagnet@list.ru

Предлагаемое программное решение представляет собой инструмент, разработанный для анализа, прогнозирования и динамической визуализации геофизических данных, которые агрегируются и распространяются множеством пространственно распределенных разнородных хранилищ данных. К ним относятся наземные магнитные обсерватории и вариационные станции, спутники, а также различные численные модели, основанные на геофизических стандартах и спецификациях. Технологический стек ограничен веб-реализацией инструмента и представлен технологиями программирования клиентских и серверных сценариев.

Реализация на стороне клиента представлена несколькими программными технологиями разметки, стилей и взаимодействия, такими как HTML5/CSS3/JavaScript с геопространственным ESRI ArcGIS API для JavaScript.

Веб-фреймворк Django, основанный на архитектурной модели "Модель – Представление – Контроллер" представляет собой реализацию на стороне сервера, где Python является основным языком программирования, используемым для бизнес-логики приложения. Полная веб-ГИС представляет собой веб-портал с набором сервисов, предоставляющих богатый инструментарий для соответствующего анализа, обработки и визуализации геофизических данных. Каждый инструмент при выполнении предоставляет интерактивное геопространственное изображение, которое генерируется в соответствии с параметрами запроса пользователя или настройками даты и времени по умолчанию. Предлагаемые веб-сервисы находятся в свободном доступе на <http://aurogaforecast.ru> и <https://geomagnetic.ru>. В настоящее время сервисы осуществляют мониторинг в режиме реального времени следующих геофизических параметров: Вероятность наблюдения полярного сияния, пространственное распределение электрического потенциала в полярной шапке, проводимость ионосферы, параметры космической погоды в первой точке Лагранжа (L1) и др. А также на основе ретроспективных данных глобальный характер пространственного распределения геомагнитных возмущений.

# Особенности напряжённого состояния недр и развитие сейсмичности в эпицентре техногенного Бачатского землетрясения

Ребецкий Ю.Л., Еманов А.Ф., Еманов А.А.

Федеральное бюджетное государственное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия

e-mail: reb@ifz.ru

Землетрясение в районе угольного разреза «Бачатский» 18 июня 2013 года ( $M_b = 5.5$ ,  $N_{eic}$ ) является крупнейшим в мире техногенным землетрясением, связанным с добычей твердых полезных ископаемых. Это создало мощный афтершоковый процесс. Было зафиксировано более 3000 подземных толчков, определены фокальные механизмы 76 афтершоков этого землетрясения. Сейсмический процесс в районе шахты за длительный период наблюдений (более 10 лет) является непрерывным и нестационарным: наблюдаются периоды фоновой сейсмичности с относительно небольшими и нечастыми событиями и периоды активизации с землетрясениями, которые ощущаются по всей Кемеровской области ( $M_L \geq 4$ ), и увеличенная (в 2-3 раза) частота небольших событий. Продолжительность сейсмических активаций составляет 1-3 месяца. За пять последних лет зафиксировано 4 активации, 3 из которых генерировали крупные землетрясения: 19.02.2012 г. с  $M_L = 4.3$ ; 04.05.2013 г. с  $M_L = 3.9$ ; 18.06.2013 г. с  $M_L = 6.1$ . Последняя активация завершилась серией ощутимых землетрясений с локальной магнитудой 3.0–3.5. Пульсирующий характер сейсмической активности недр разреза свидетельствует о повышенной сейсмической опасности в данной части Кемеровской области и необходимости инструментального контроля за развитием процесса.

Бачатское землетрясение и вся наведенная сейсмичность около него пространственно увязываются с угольным разрезом, ориентировка механизма очага этого землетрясения соответствует ориентировке длинной оси разреза, оно произошло в осадках впадины, имеет малую глубину очага, график повторяемости имеет наклон, отличный от природной сейсмичности. Отмеченные факты указывают на техногенную природу Бачатского землетрясения и сейсмической активации, в пространственно-временных рамках которой оно произошло. Концентрация землетрясений в виде скоплений около добывающих уголь шахт и разрезов свидетельствует о доминировании наведенной сейсмичности над природной в исследуемом регионе.

Механизм очага Бачатского землетрясения представляет собой взброс с нодальными плоскостями, имеющими согласно Global CMT ЗСЗ-ВЮВ простирание. Одна из этих плоскостей круто погружена на ЮЮЗ, а другая полого – на ССВ. Наиболее вероятно связать Бачатское землетрясение с Афонино-Кисилевской системой взбросов, имеющих в диапазоне глубин до 3 км близкое простирание. Эти разломы на глубинах более 3 км выполаживаются, формируя листрическую систему взбросов. В этой связи, наиболее вероятно, что напряженное состояние, в котором данное землетрясение возникло, отвечает ССВ-ЮЮЗ ориентация оси наибольшего сжатия с пологим погружением на ЮЮЗ. Соответственно, минимальное сжатие ориентировано субвертикально с погружением на ССВ. Это напряженное состояние является горизонтальным сжатием, и мы его рассматриваем как базисное - форшоковое, действовавшее до Бачатского землетрясения.

Тектонофизический анализ показывает, что горные работы по углублению угольного разреза приводят к уменьшению вертикальных сжимающих напряжений должны сопровождаться ростом максимальных касательных напряжений и снижением изотропного давления. Эти изменения автоматически увеличивают уровень кулоновых напряжений, приближая момент достижения критического состояния.

Тектонофизическая реконструкция природного напряженного состояния, выполненная по данным о фокальных механизмах афтершоков Бачатского землетрясения, позволила установить

его несоответствие форшоковому напряженному состоянию района разреза. Наибольшая перестройка поля напряжений произошла в северо-западном секторе Бачатского разреза. Здесь в афтершоковой последовательности в основном наблюдается режим горизонтального сдвига (более 70% определений напряжений). Причем напряжения наибольшего сжатия, сохранив субгоризонтальную ориентацию, сменили простирание на СЗ –ЮВ направление. В этом секторе в СВ-ЮЗ направлении действуют оси минимального сжатия. Таким образом, в этом секторе произошли наибольшие изменения напряженного состояния. В юго-восточном секторе разреза сохранился режим горизонтального сжатия, но ориентации оси наибольшего сжатия здесь изменилась почти на 90 град.

В докладе основное внимание будет уделяться тектонофизическим аспектам техногенной активизации сейсмичности.

## Акустическая модель инициирования деформационных процессов в геоматериалах и геосредах экзогенными воздействиями / гипотеза механизма "гомеопатического" триггера? /

---

Богомолов Л.М. (1), Наймарк О.Б. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

(2) Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

e-mail: bleom@mail.ru

В поисках механизма, который может обеспечить триггерное влияние на деформационный процесс весьма слабых экзогенных возмущений (в частности, электромагнитных полей) имеет смысл проанализировать условия возникновения и устойчивости сдвиговых волн в упруго-вязкой среде. Наибольшее значение для объяснения такого влияния имеют очень медленные волны, у которых фазовая скорость меньше скорости частиц при экзогенных возмущениях, так что может реализоваться фазовый резонанс (известный по эффекту Вавилова-Черенкова). Стандартная теория упругости описывает сейсмические или акустические волны, в зависимости от диапазона частот, но их скорость высока, и резонанс со слабыми возмущениями невозможен. В обычной гидродинамике сплошных сред такие поперечные волны также отсутствуют. В докладе показано, что для реологического тела Максвелла может существовать диапазон волновых чисел  $k$ , в котором существуют искомые поперечные волны. Для системы уравнений движения сплошной среды: уравнения непрерывности (или несжимаемости, в частности), уравнения Навье-Стокса и реологического соотношения Максвелла получены дисперсионные соотношения  $\Omega(k)$ . Расчет проведен для двумерной модели. Условие  $\Omega(k)=0$  определяет точки, в которых фазовая скорость волн обращается в нуль. В этих точках система наиболее восприимчива к экзогенным воздействиям. Сдвиговые волны, которые могут возбуждаться за счет энергии внешних источников, являются затухающими. Поэтому триггерные эффекты могут реализоваться лишь при достаточно мощных воздействиях, которые, тем не менее, значительно слабее энергетики деформационных процессов. Стоит отметить сходство использованной модели с хорошо известной моделью Родионова, описывающей деформирование геологической среды в одномерном приближении. В случае, когда в невозмущенном состоянии существует течение, возможно возникновение неустойчивости даже при очень малых числах Рейнольдса. Это находится в соответствии с известным результатом о неустойчивости ламинарного течения в пограничном слое. Обсуждается возможность применения полученных результатов для описания деформационных процессов в разломных зонах.

# Моделирование локализации сдвигов и перехода геосреды к неустойчивым режимам деформирования методом дискретных элементов

---

Журкина Д.С. (1), Клишин С.В. (1), Лавриков С.В. (1), Леонов М.Г. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: lvk64@mail.ru

С использованием численного метода дискретных элементов рассмотрена задача о сдвиговом деформировании образцов сыпучей среды в стесненных условиях.

Предложены различные алгоритмы формирования начальных образцов (упаковок частиц) кубической формы с заданной относительной плотностью. Показано, что эффективными являются алгоритмы, использующие уравнения движения на основе механики Аристотеля – сила пропорциональна скорости, а не ускорению, как это имеет место в механике Ньютона. Главным является то обстоятельство, что в стационарном состоянии уравнения Аристотеля и уравнения Ньютона дают один и тот же результат – сумма сил и моментов сил, действующих на каждую частицу, равны нулю [1].

Проведена серия численных расчетов по сдвиговому нагружению образцов сыпучей среды при учете на контактах между частицами трения скольжения, сопротивления качению, вязкости. В расчетах варьировались начальная плотность образцов, а также различные краевые условия, обеспечивающие либо мягкое (силовое) нагружение, либо жесткое (кинематическое) нагружение, в том числе с подавлением дилатансии за счет сохранения постоянного объема образца.

Показано, что для всех рассмотренных образцов существуют критические значения сдвиговой деформации. По достижении критической величины сдвига устойчивость деформирования нарушается. В материале формируются изолированные поверхности скольжения, разделяющие его на отдельные блоки. Дальнейшее деформирование сводится к относительному сдвигению этих блоков практически как жестких целых. На диаграмме сдвига переход к неустойчивому режиму деформирования сопровождается выходом на ниспадающую ветвь (разупрочнение). На уровне дискретных элементов (частиц) образца наблюдается перераспределение действующих напряжений и формирование новых силовых цепочек. Анализ кинематики показывает, что имеет место перераспределение скоростей частиц, отнесенных к различным блокам формирующейся блочной структуры, что согласуется с данными лабораторных экспериментов [2], полученными ранее в ИГД СО РАН. Приведены диаграммы сдвигового нагружения и картины распределения скоростей частиц в образце в момент потери устойчивости и формирования блочной структуры.

Полученные результаты могут быть использованы для моделирования неустойчивых режимов деформирования, приводящих к дезинтеграции и разрыхлению крупных геологических объектов. Есть данные, что указанные явления могут играть существенную роль в формировании структуры и реологии горных пород [3].

Расчеты проводились на основе оригинального программного обеспечения, разработанного в ИГД СО РАН, а также с привлечением программного обеспечения Altair EDEM (академическая лицензия).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00008, <https://rscf.ru/project/21-17-00008/>.

1. Klishin S.V., Mikenina O.A. DEM Generation of Particle Packs in the Aristotelian Mechanics // AIP Conference Proceedings 2448 (2021), 020011.

2. Бобряков А.П., Клишин С.В., Косых В.П., Лавриков С.В., Микенина О.А., Ревуженко А.Ф. РІV-методика для определения поля деформаций при выпуске сыпучих материалов // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2018. – № 4. – с. 343-347.

3. Леонов М.Г., Кочарян Г.Г., Ревуженко А.Ф., Лавриков С.В. Тектоника разрыхления: геологические данные и физика процесса // Геодинамика и тектонофизика. – 2020. – т. 11. – № 3. – с. 491-521.



## Влияние аномального сопротивления на формирование геомагнитной полости в расширяющейся струе

---

**Ковалев А.Т., Ковалева И.Х.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН), Москва, Россия

e-mail: kirsan1101@mail.ru

Аномальный перенос плазмы при инъекции высокоскоростных плазменных струй в лабораторных плазменных и активных ионосферных экспериментах находится в центре внимания многих исследований. Моделирование динамики струй упирается в сложности адекватного учета аномального переноса и нагрева электронов и ионов плазмы. Часто для этого используются модели с произвольными свободными параметрами в попытках достичь согласия с экспериментальными данными. В работе на основе физической модели электронной и ионной турбулентности предпринята попытка дать магнитогидродинамическое описание формирования геомагнитной полости при расширении плазменной струи в бесстолкновительной плазме верхней ионосферы Земли. Предполагалось, что аномальное сопротивление возникает в областях, где возникают большие дрейфовые токи электронов. Мелкомасштабные флуктуации электронов формируются в нелинейные волновые структуры, которые, в отличие от линейных волн переносят электроны вдоль направления крупномасштабного электрического поля, приводя к их нагреву. Баланс температуры электронов определяется уровнем турбулентности и концентрации нейтралов, на которых происходит рассеяние электронов, сопровождающееся возбуждением и дополнительной ионизацией. Электронная турбулентность становится источником аномального рассеяния ионов и определяет их аномальный перенос с формированием ионных нелинейных волновых структур, дающих ускорение и нагрев ионов. Была проведена попытка формализовать результаты микроструктурного моделирования и ввести их в виде коэффициентов переноса в крупномасштабный расчет расширения плазменной струи в рамках магнитной гидродинамики. Получено, что рассмотренные процессы существенно влияют на положение границы геомагнитной полости как на переднем, так и на заднем фронте струи и изменяют время существования каверны.

## **Оценка антропогенного влияния на глубину сезонного промерзания грунтов (на примере Усольского Химпрома)**

---

**Юрьев А.А., Рыбченко А.А.**

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

e-mail: zuzua2016@gmail.com

Цель исследования: Оценить влияния антропогенного вмешательства на глубину сезонного промерзания дисперсных грунтов с учетом изменения их теплофизических свойств.

Задачи: Сбор и обработка материалов и данных прошлых лет;

Подготовка предварительных схем расположения выработок;

Рекогносцировочные и маршрутные обследования;

Изучение опасных геологических и инженерно-геологических процессов (при наличии);

Выполнения буровых работ с ведением документации и отбором проб грунтов на влажность, с фиксированием положения уровня грунтовых вод;

Проведение полевых исследований свойств грунтов;

Выполнения гидрогеологических наблюдений;

Построение геолого-литологического разреза по результатам бурения

Измерения температуры грунтов в режиме реального времени;

Замер мощности снежного покрова, на месте выработки;

На исследуемом объекте, в прошлом осуществлялась экономическая деятельность, связанная с производством химических веществ и химических продуктов. Исследуемый объект сложен палеозойскими, мезозойскими и кайнозойскими породами.

На основе полученных данных, при бурении скважин нам удалось установить диапазон СМГ на исследуемом участке. Такая разная глубина СМГ, объясняется действующими коллекторами и химическим загрязнением грунтов.

Для решения поставленных задач проводились: полевые, лабораторные, экспериментальные исследования, а также применялись современные структурнолитологические, инженерно-геологические и геокриологические методы.

Для определения современного температурного состояния грунтов используется метод температурных замеров с применением термометрических кос.

На основе полученных данных был построен диапазон температур грунтов, на глубине от 1 до 5 метра, по которому возможно отследить, в трех направлениях, утечку химикатов в грунт.

При температуре не ниже  $-1.1$  °С мощность сезонного слоя варьируется в пределах от 1.0 м до 1.5 м, а при температуре  $-2.2$  °С глубина протаивания не достигает отметки 1.0 м.

## Хубсугульское землетрясение 2021 года в структуре сейсмичности Тувино-Монгольского блока

---

**Еманов А.Ф. (1), Еманов А.А. (1, 2), Чечельницкий В.В. (3),  
Шевкунова Е.В. (1), Фатеев А.В. (1, 2), Кобелева Е.А. (3), Арапов В.В. (1)**

(1) Алтае-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

(3) Байкальский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Иркутск, Россия

e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Тувино-Монгольский блок земной коры древний элемент земной коры Центральной Азии. К нему относятся крайние на юго-запад рифтовые впадины Байкальской рифтовой системы. Именно в этом блоке граница между разными видами распределения землетрясений по геологическим структурам. Один вид характерен для Алтае-Саянской области, а другой для Байкальской рифтовой зоны. К тектоническим границам Тувино-Монгольского блока приурочены крупнейшие землетрясения Центральной Азии: Цэцэрлэнгское 1905г, с  $M=7.6$  и Болнайское 1905г, с  $M=8.2$ , а так же серия более слабых, последнее из которых Хубсугульское, 2021г. С  $M=6.9$ . Землетрясения в районе Тувино-Монгольского блока интересны своими афтершоковыми процессами. Рассмотрены пространственно-временные особенности афтершоковых процессов землетрясений, приуроченных к Тувино-Монгольскому блоку: Хубсугульского, Бусингольского, Белин-Бий-Хемского и др. Хубсугульское землетрясение приурочено к тектоническому разлому, являющейся границей блока и более семи тысяч афтершоков позволяют восстановить особенности развития сейсмичности разломной зоны. Афтершоки развиваются вдоль локальной зоны разлома и со временем наблюдается переход сейсмической активности к оперяющим разломам с восточной стороны, уходящим по направлению к Хубсугульской рифтовой впадине. Бусингольское землетрясение произошло, около западной границы Тувино-Монгольского блока и приурочено не к основному Бусингольскому разлому, а к оперяющему, уходящему в сторону Шишхидского нагорья. Афтершоковый процесс сформировался как серия активизаций по времени смещающихся от Бусингольской впадины вглубь нагорья и является длительным пульсирующим процессом развития тектонического разлома по направлению. На основе исследований афтершоков крупных землетрясений в окрестности Тувино-Монгольского блока были сделаны выводы: Блок является тектонической структурой, играющей ведущую роль в изменении структуры сейсмичности от Алтайской к Байкальской; многие из крупных землетрясений связаны с тектоническими напряжениями в окрестности оперяющих разломов; Хубсугульское землетрясение кроме интенсивного афтершокового процесса вызвало активизацию структур Тувино-Монгольского блока и сопряженных с ним структур.

## Метод стоячих волн в исследовании и мониторинге зданий и инженерных сооружений сложных конструкций

---

Еманов А.Ф. (1), Бах А.А. (1), Белостоцкий А.М. (2, 4), Еманов А.А. (1, 3), Хорошавин Е.А. (5), Дмитриев Д.С. (2), Нагибович А.И. (2), Дураченко А.В. (1), Шеболтасов А.Г. (1)

(1) Алтае-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия

(2) Научно-исследовательский центр СтаДиО, Москва, Россия

(3) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

(4) Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

(5) Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», Красноярск, Россия

e-mail: emanov@gs.nsc.ru

Здания и сооружения находящиеся под постоянным сейсмическим воздействием (будь это взрывы или землетрясения) необходимо исследовать и осуществлять их постоянный мониторинг. Рассматриваются возможности метода стоячих волн для исследования зданий разных конструкций, а так же варианты использования данных этого метода в выполнении мониторинга с целью оценки сейсмостойкости. Рассматриваются два варианта разработки технологии сейсмического мониторинга инженерных сооружений. Первый основан на разработке конечно элементной модели и расчёте динамических характеристик собственных колебаний сооружения. Далее выполняются исследования объекта методом стоячих волн с целью изучения реальных его собственных колебаний по полному набору собственных частот с построением карт амплитуд волн, фаз волн, когерентности и т.п.. На основе сравнения теоретических и экспериментальных данных по полному набору стоячих волн осуществляется корректировка расчётной конечно элементной модели. Скорректированная модель является основой расчёта сейсмостойкости сооружения. Приводятся примеры сопоставления расчетных стоячих волн и выделенных методом стоячих волн из эксперимента. Показано, что в большинстве случаев расчётные собственные частоты имеют отличия от реально зарегистрированных до 25%, корректировка модели позволяет существенно приблизить теоретические и экспериментальные собственные частоты. Максимальные отличия не превышают 7%. Расчёт сейсмостойкости зданий на основе скорректированных моделей обладает большей научной обоснованностью. Ещё одним аспектом изменения параметров собственных колебаний зданий является загрузка его оборудованием и предметами. Примером является библиотека им. Ленина в Москве. Существенное изменение массы здания книгохранилища привело к значительному изменению собственных колебаний. Возникли интенсивные кратные моды вертикальных собственных колебаний. Исходя из результатов предлагаются периодические обследования методом стоячих волн особо важных объектов для корректировки изменяющейся модели. Второй вариант технологии мониторинга зданий основан на создании в здании сети датчиков инженерно-сейсмологического мониторинга и непрерывном мониторинге с целью обнаружения изменений после каждого интенсивного сейсмического воздействия. В этом случае обработка выполняется совместно с данными региональной сети сейсмологических станций. В систему мониторинга здания входит информация о природе источника сейсмического воздействия и его характеристиках. Предварительным шагом к созданию сети мониторинга является детальное обследование методом

стоячих волн, когда выявятся все собственные частоты здания и узловые линии на каждой из частот. Такая информация позволяет спроектировать сеть с минимальным количеством датчиков для непрерывного мониторинга. Изучение текущих характеристик собственных колебаний позволяет выявить моменты и места возникших при сейсмическом воздействии нарушений через изменения в полном поле стоячих волн в здании.

## Закономерности возникновения и развития наведённой сейсмичности в районах добычи полезных ископаемых в Алтае-Саянской области

---

Еманов А.А. (1, 2), Еманов А.Ф. (1), Фатеев А.В. (1, 2), Шевкунова Е.В. (1), Антонов И.А. (1), Корабельщиков Д.Г. (1), Ершов Р.А. (1)

(1) Алтае-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия  
e-mail: alex@gs.nsc.ru

По результатам мониторинга сейсмичности в Западной Сибири изучаются сейсмические активизации около угольных предприятий и железорудных шахт. Установлено, что наиболее сильные активизации недр в районе горных выработок протекают как кратковременные активизации длительностью 1-2 месяца и повторяющиеся несколько раз через один-два года. Следующие подобные активизации происходят уже на других объектах. Экспериментально доказано существование разных видов наведённой сейсмичности на территории Кузбасса. Наведённая сейсмичность около шахт формируется как облако эпицентров землетрясений в районе забоя под выработкой на глубину до полутора км и смещается в пространстве вслед за забоем. Остановка работы добывающего оборудования мгновенно отражается на сейсмической активности, как и возобновление добычи. Блуждающая наведённая сейсмичность - это сейсмические события на участках, где завершена добыча подземным способом, но горные породы находятся в неравновесном состоянии. Наведённая сейсмичность под открытыми разрезами и под отвалами около разрезов. Для такого типа сейсмичности глубины событий от ложа разреза до 4-5 км. Именно к этому типу наведённой сейсмичности относятся землетрясения с магнитудами от 4 до 6 и именно эти землетрясения представляют наибольшую техногенную опасность для населения и зданий на поверхности. Отдельное внимание уделено развитию сейсмичности в местах совместного воздействия на недра открытых и подземных горных выработок. Примером является взаимодействие в районе разреза Калтанский и шахты Алардинская, когда подземная выработка окружена разрезами и подвергается постоянному сейсмическому воздействию от промышленных взрывов. Мы наблюдаем два вида наведённой сейсмичности когда одна развивается внутри другой. Под выработками шахты Алардинская протекает привязанная к ней наведённая сейсмичность с магнитудами от 0 до 2, а вокруг неё сформировалась активизация с более крупными событиями с магнитудами до четырёх и на больших глубинах. Другим вариантом взаимодействия разных выработок является наведённая сейсмичность под шахтой Ерунаковская-8. Микросейсмичность под шахтой обнаружена задолго до появления событий с магнитудами более трёх. Причиной активизации является ведение подземных горных работ под отвалом около разреза. Наблюдается закономерное смещение микросейсмичности в пространстве под выработками.

В Горной Шории Обнаружен эффект частичной синхронизации развития сейсмичности на рудниках Казский, Шерегешский, Таштагольский, отстоящих друг от друга на удалениях в сотни км. В данном случае установлен факт инициирования сейсмичности около рудников из-за изменения напряжённого состояния земной коры в целом. Именно в это природно-техногенная сейсмичность.

## Эволюция сейсмичности Алтая после Чуйского землетрясения 2003 года

---

**Еманов А.А. (1, 2), Еманов А.Ф. (1), Фатеев А.В. (1, 2), Шевкунова Е.В. (1), Гладышев Е.А. (1)**

(1) Алтай-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия  
e-mail: alex@gs.nsc.ru

Чуйское землетрясение 2003 г. оказало заметное влияние на сейсмичность всего Алтая. В докладе представлены данные об изменении сейсмического режима Алтая с 2003 по 2021 гг. В основе исследований поставлены материалы плотной сети станций Алтайского сейсмологического полигона и экспериментов с десятками временных станций. Показано, что в первые полгода после крупного землетрясения 2003 г. землетрясения происходят в эпицентральной зоне, а иные структуры Алтая асейсмичны. В это время изучена устойчивая структура сейсмически активизированных разломов. Сдвиговая деформация, сформировавшаяся при Чуйском землетрясении, сопровождается вытянутым вдоль неё пространственно прерывистым афтершоковым процессом. Отмечаются участки магистральной подвижки, в пределах которой разрыв поверхности и линия афтершоковой активности совпадают, а также участки разрыва поверхности без афтершоковой активности. Развитие афтершокового процесса только частично приурочено к блокоразделяющим разломам, а чаще афтершоковый процесс смещен относительно этих разломов или в виде ответвлений уходит в сторону. Обнаружены горизонтальные сейсмически активизированные слои, отходящие от основного разрыва в сторону.

После 2009 г. формируются изменения как в ближней зоне, охватывающей смежные с эпицентром геологические структуры, такие как Айгулакский, Курайский, Южно-Чуйский, Северо-Чуйский хребты, так и в дальней зоне на удалениях 250-300 км от эпицентра и в разных направлениях от него. После Айгулакского землетрясения 2019 г. сформировался афтершоковый процесс, обеспечивший смещение центра сейсмичности Алтая в одноимённый хребет. Объяснение развития сейсмичности вокруг очага Чуйского землетрясения в пространстве и с задержками по времени на годы может быть дано на основе влияния крупного землетрясения на многослойную по физическому состоянию литосферу в соответствии с моделями, где предполагается возникновение нарушений при крупном землетрясении не только в хрупкой части земной коры, но и в слоях с высокой пластичностью. Другой вариант объяснения может быть связан с пластичностью в упругой части земной коры или с особенностями сеймотектонических процессов в блочной структуре.

# О нестационарной реакции сыпучей среды на периодические сдвиговые деформации

---

Косых В.П., Лавриков С.В., Ревуженко А.Ф.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

e-mail: v-kosykh@yandex.ru

Опыты проводились на приборе простого сдвига [1] с размером камеры 90x90x130 мм. В качестве исследуемого материала использовался сухой кварцевый песок со средним размером частиц 0.8 мм. Высота засыпки материала составляла 120 мм. Программа нагружения заключалась в циклических сдвигах камеры относительно центрального положения на угол плюс-минус 2.5 град. со скоростью 0.5 град./с. Проводились измерения усилий нагружающего устройства, нормальных напряжений внутри образца и его высоты.

Обычно считается, что за 30 – 50 циклов сдвиговых деформаций сыпучий материал переходит в стационарное состояние и диаграммы напряжений и дилатансии становятся периодическими. Однако ранее полученные результаты по длительным слабым динамическим воздействиям на геосреду дают основание предположить существование отклонений в стационарности диаграмм. В представленной работе были проделаны опыты, в которых число циклов нагружения уже после достигнутого «стационарного состояния» составляло 20 тысяч. Эксперименты показали, что диаграммы действительно являются нестационарными - с увеличением числа циклов наблюдаются колебания максимальных напряжений относительно среднего значения. Амплитуда этих колебаний достигала плюс-минус 15%.

Полученный результат дает основание считать, что длительные слабые периодические воздействия в других ситуациях, как и в описанных выше опытах, также дают неперiodические реакции. Так, в опытах по динамическому слабому воздействию было зафиксировано колебание напряжений, достигающее 50% от величины веса пород [2]. При оценке предельных состояний подобные эффекты необходимо учитывать.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00008, <https://rscf.ru/project/21-17-00008/>.

1. Косых В.П., Ревуженко А.Ф., Прибор простого сдвига//ФТПРПИ. – 2021. - №4. – С. 171-177.
2. Kazantsev A.A., Kosykh V.P., Revuzhenko A.F., Spectral analysis of granular material reaction to long-term weak dynamic effect. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 91 (2015) 012089 doi:10.1088/1757-899X/91/1/012089



## Признаки преобразования вещества вдоль поверхностей смещения приповерхностных разрывов

---

Стром А.Л.

Общество с ограниченной ответственностью "Центр геодинамических исследований" Москва, Россия

e-mail: strom.alexandr@yandex.ru

Рассматриваются молодые разрывы, смещающие цокольные террасы, поверхности смещения которых прослеживаются в толще коренных пород (ниже подошвы аллювия) и сложены "глинкой трения" мощностью от нескольких миллиметров до сантиметров, реже до первых десятков сантиметров. В качестве "исходной" вмещающей породы выступают граниты, метаморфизованные песчаники и глинистые сланцы, кварциты. Среди этих "глинок трения" можно выделить два основных типа. К первому типу отнесены разрывы, швы которых действительно образованы глиной трения с ярко выраженной милонитовой структурой, состоящей, в значительной мере из глинистых минералов, отсутствующих в исходной породе. У разрывов второго типа швы сложены микробрекцией - т.е. сильно раздробленными зернами кристаллов, образующих исходную породу. Приведены данные о гранулометрическом составе этих "глинок трения" и о его изменении в зависимости от способа подготовки проб. То обстоятельство, что исследованные разрывы рвут аллювиальные отложения речных террас, говорит, во-первых, о молодости последних подвижек по разрывам, а, во-вторых, что преобразование исходной породы в "глинку трения" в том числе с образованием новых минералов, происходило в приповерхностных условиях, т.е. в отсутствие высоких температур в массиве в целом и высоких литостатических давлений. Предполагается, что эти преобразования могли происходить непосредственно в момент подвижки по разрывам, что сопровождалось интенсивным истиранием, и, возможно, локальным повышением температуры вследствие трения. Приведены также примеры интенсивного разрушения, вплоть до образования частиц субмикронного размера, в нижних частях крупных каменных лавин, где происходили значительные сдвиговые деформации.

## Механизм формирования орогена Высокая Азия

---

**Алексеев Р.С., Ребецкий Ю.Л.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта  
Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: rs.alekseev@physics.msu.ru

В выполненной ранее глобальной реконструкции наряженного состояния [Ребецкий, 2020] было показано, что повышенный уровень горизонтального сжатия в континентальных орогенах не связан с дальнедействием напряжений на границах плит, также отмечено, что силу тяги со стороны погруженной и утяжеленной части литосферы, находящейся на глубинах более 100 км стоит рассматривать, как одну из главных причин движения плит. Объединяя эти факторы и данные полученные в различных исследованиях была создана модель, которая включает в себя несколько важных пунктов: 1) утолщение коры под Тибетом не является результатом давления со стороны Индостанской плиты, а является следствием метаморфических преобразований и выплавок, произошедших в океанической литосфере, погруженной под континент; 2) для образования большого в поперечнике орогена необходим механизм поступления флюида, который является необходимым условием начала преобразований, на большие расстояния; 3) таким механизмом служит ускоренное надвигание Тибета на Индостанскую плиту в результате отрыва палеослэба дальнейшим затягиванием Евразийской платформы во встречном направлении; 4) в результате такого движения образуется слой продавленной океанической литосферы, который выполаживается вдоль подошвы континентальной литосферы и переносит процессы преобразования вещества дальше от будущей зоны коллизии; 5) после отрыва слэба процесс сближения ускоряется, что приводит к меньшим потерям флюида при продвижении океанической литосферы. В работе представлена модель формирования орогена Высокой Азии, которая включает в себя три основных импульса поднятия. Первый импульс поднятия, начавшийся около 40 млн лет назад, обусловлен продвижением Тибетской литосферы навстречу Индийской плите за счет сил затягивания, появившихся в результате отрыва палеослэба. Второй импульс поднятия начинается около 14-8 млн лет назад. Это поднятие возникло в результате отслаивания тяжелых фракций пород литосферы, которые появились в результате взаимодействия флюидонасыщенной океанической литосферы, полого выположенной вдоль литосферы Тибета в результате встречного движения. Третий, и самый большой импульс поднятия, происходит около 4-3 млн лет назад, когда окончательно сформировавшаяся тяжелая капля в подошве Тибетской литосферы отрывается и начинает погружаться. Данные по временам поднятий коррелируют с данными по вулканизму, а наличие погружающейся капли фиксируется в сейсмографических исследованиях.

## Вариации метеорологических и атмосферно-электрических величин при прохождении мезомасштабных конвективных систем (комплексов)

---

Нагорский П.М. (1), Пустовалов К.Н. (1, 2), Оглезнева М.В. (1),  
Смирнов С.В. (1)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

(2) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

e-mail: npm\_sta@mail.ru

Изменение климата ведет к изменению повторяемости кучево-дождевой облачности и связанных с ней опасных метеоявлений. Наиболее опасными её проявлениями являются мезомасштабные конвективные системы (МКС), а в особенности их разновидность – мезомасштабные конвективные комплексы (МКК). Последствия прохождения МКС (МКК) на территории юга Западной Сибири изучены недостаточно, поэтому исследования в приземном слое атмосферы метеоявлений, связанных с прохождением МКС (МКК), являются весьма актуальными. В работе представлены результаты исследований влияния прохождения МКК, сопровождающихся интенсивными ливневыми осадками, на основные метеорологические величин в приземном слое атмосферы.

Динамика изменения основных метеовеличин рассмотрена на примере прохождения МКК 10-11 июня 2018 г. С 10 по 11 июня над югом Западной Сибири прошла облачная система циклона, развивающегося на полярном фронте, разделяющем умеренную и тропическую воздушные массы. Облачная система холодного фронта и фронта окклюзии циклона была представлена, главным образом, серией МКК, выстроившихся вдоль приземной линии фронта. Крупнейший из этих МКК в ночь с 10 на 11 июня прошёл непосредственно над г. Томском.

В результате проведенного исследования.

- Установлено, что вариации метеовеличин в приземном слое (температуры воздуха  $T$ , давления  $P$ , скорости  $v$  ветра и др.) существенно отличаются от вариаций градиента потенциала  $\text{grad}\phi$ , тесно связанного с распределением электрических зарядов в МКК, а именно: а) начало вариаций  $\text{grad}\phi$ , обусловленных МКК, по крайней мере на  $\sim 3/4$  часа опережают реакцию метеовеличин приземного слоя атмосферы на прохождение МКК; б) временная задержка  $dt$  начал вариаций  $\text{grad}\phi$  между измерительными пунктами «Университет» и «ИМКЭС» (расстояние  $\sim 7,5$  км по широте) составляет  $\sim 15$  мин и сокращается практически до нуля после начала вариаций основных метеовеличин; в) для  $T$ ,  $P$  и  $v$ . задержка  $dt$  составила не более 3 минут; г) на начальном этапе прохождения МКК преобладают положительные молниевые разряды, а затем – отрицательные.

- Выявлено: скорости ветра в приземном слое и на уровне 300 мбар (вблизи тропопаузы) практически направлены навстречу друг другу (по данным реанализа ERA5).

Выполнено при поддержке госбюджетной темы (№ госрегистрации 121031300154-1).

## Сейсмоакустические проявления обратного сейсмоэлектрического эффекта 2-рода при электроразведках геосреды в зоне Центрально-Сахалинского разлома

---

Богомолов Л.М. (1), Костылев Д. . (1, 2), Дудченко И.П. (1), Гуляков С.А. (1), Стовбун Н.С. (1)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

(2) Сахалинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

e-mail: bleom@mail.ru

Постановка и цель эксперимента по электроразведке геосреды с применением новых источников тока определялась следующим. Прямой и обратный сейсмоэлектрические эффекты уже исследованы в достаточной степени на масштабах от метров до первых сотен метров. На их основе разработаны методы сейсмоэлектрической разведки недр, позволяющие оконтуривать месторождения нефти и газа, уточнять положение границы между углеводородами и прочими поро-трещинными флюидами. Для зондирования используются вибраторы (прямой эффект), или источники электрического тока (обратный эффект). При проведении электроразведки на этом масштабе ток в первичном диполе как правило не превышает 1-2 А. Геофизические эксперименты с применением мощных источников тока (МГД-генераторы, электроимпульсные генераторные установки) сделали возможным обнаружить эффект сейсмического отклика на электроразведку, который можно также относить к обратному сейсмоэлектрическому эффекту 2 рода на масштабах десятки – сотни км. Для лучшего понимания закономерностей обратного сейсмоэлектрического эффекта может быть полезна информация о реакции геосреды на электровоздействие на промежуточном масштабе – сотни м – первые км. В докладе представлены результаты такого эксперимента, который был проведен в 2021 г на мини-полигоне Петропавловское (Анивский район, о. Сахалин). В качестве источника электрических импульсов использовался разработанный в ИМГиГ ДВО РАН полупроводниковый коммутатор тока до 40 А, выдерживающий в закрытом состоянии напряжение до 800 В. При электроразведках импульсы тока подавались на первичный диполь длиной около 400 м, который был расположен по восточному борту Центрально-Сахалинского разлома. Было проведено 4 сеанса зондирования, по одному в календарные сутки. Каждый сеанс включал серию из 200 импульсов тока силой 5-7 А и длительностью 20 с, межтоковая пауза составляла 20 -40 с. В эксперименте 15, 16 и 18 ноября 2021 г зондирования проведены в период, который приходится на астрономический полдень (около 13:40 местного времени, UTC+11). 17 ноября эксперимент проходил непосредственно перед наступлением астрономической полуночи. Для регистрации сейсмоакустических сигналов использовались молекулярный широкополосный сейсмометр, а также молекулярно-электронный гидрофон, установленный в заводненном шпуре вблизи одного из полюсов. Кроме того, в районе проведения эксперимента велась запись сейсмического шума на сеймостанциях сети Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН. В эксперименте были получены следующие основные результаты. По записям волновых форм сигналов с гидрофона выделяются периоды с серией импульсов тока, в течение которых амплитуда сейсмоакустических сигналов заметно увеличивается. Спектрально – временной анализ сигналов с гидрофона также указывает на реакцию среды на электроразведку. Изменения проявляются в виде возрастания спектральной плотности в полосах частот 4.3 Гц (+/- 0.2 Гц) и 12.5 Гц (+/- 0.2 Гц).

Вариации уровня микросейсмического шума в период электроразведки и в последующие дни были также зарегистрированы сейсмическими станциями «Огоньки» (ОГК) и «Ожидаево»

(OJD) сети Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Однако связать их с электровоздействием не представляется возможным из-за прохождения циклонов, при которых барические вариации могли вызвать увеличение амплитуды микросейсмического шума на порядок или еще больше.

## Изменчивость невозмущённого электрического поля на юге Западной Сибири (на примере г. Томска)

---

Пустовалов К.Н. (1, 2), Нагорский П.М. (1), Оглезнева М.В. (1), Смирнов С.В. (1)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

(2) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

e-mail: npm\_sta@mail.ru

Известно, что унитарная вариация градиента потенциала электрического поля (кривая Карнеги) представляет собой глобальный ежедневный вклад электрической активности в районах нарушенной погоды. Однако, вклад региональных и локальных факторов может существенно влиять на суточные вариации приземного электрического поля в различных регионах земного шара. В связи с этим, целью данной работы является оценка изменчивости градиента потенциала электрического поля в условиях «хорошей погоды» на юге Западной Сибири на примере г. Томска.

Исследование было основано на данных измерений градиента потенциала электрического поля, выполняемых в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН с помощью флюксометров «Поле-2» и «CS110». Анализировался временной ряд среднeminутных значений градиента потенциала за 2006–2020 гг. При отборе случаев, соответствующих условиям «хорошей погоды», использовались данные наблюдений за облачностью и атмосферными явлениями в стандартные сроки, полученные на метеостанции Томск.

Получены следующие основные результаты. Изменчивость значений градиента потенциала в Томске в условиях «хорошей погоды», в целом, определяется логнормальным распределением. Среднее арифметическое и модальное значения градиента потенциала в Томске в условиях «хорошей погоды» составляют 282 и 252 В/м. В целом за год, типичные значения градиента потенциала в условиях «хорошей погоды», ограниченные интервалом от 25- до 75-процентиля, изменяются в диапазоне 161–372 В/м.

Получены оценки изменчивости градиента потенциала для различных сезонов года и отдельно для холодного и тёплого периодов года. В сезонном ходе наибольшие значения градиента потенциала отмечаются зимой, а наименьшие – летом. Среднее арифметическое и медианное его значение в Томске зимой составляют 301 и 267 В/м, весной – 301 и 278 В/м, осенью – 290 и 263 В/м, а летом – 225 и 218 В/м. Типичные значения градиента потенциала для зимы, весны, осени и лета – 146–424 В/м, 190–387 В/м, 160–386 В/м и 146–286 В/м.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (РНФ), № 22-27-00482, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00482>.

# Воздействие акустико-гравитационных волн при извержении вулкана Тонга на концентрацию микрочастиц в приземном слое атмосферы г. Москвы

---

**Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Крашенинников А.В., Рыбнов С.Ю.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: rybnov.y@mail.ru

Представлены данные инструментальных наблюдений, выполненные в Центре геофизического мониторинга Москвы ИДГ РАН в период взрывного извержения вулкана Хунга-Тонга Хунга-Хаапай. Извержение произошло 15.01.2022 г. в 04:10 UTC (<https://www.gismeteo.ua/news/stihiynnye-yavleniya/38966-izverzhenie-vulkana-vozle-tongaprivelo-k-tsunami-v-amerikanskom-samoa/>). Известно, что эксплозия вулканов вызывает мощные волновые возмущения в атмосфере, которые могут распространяться на десятки тысяч километров. Измерения вариаций геофизических полей проводились измерительным комплексом в составе: оптический датчик твердых частиц Sensirion SPS30; метеостанция Davis Instruments Vantage Pro2 и микробарометр МБ-03. В период с 15.01.2022г. по 16.01.2022г. были зарегистрированы заметные вариации атмосферного давления и интенсивные акустико-гравитационные волны (АГВ). Так 15.01.2022 г. ~ 18:30 UTC была зарегистрирована акустико-гравитационная волна амплитудой ~ 260 Па, длительностью ~ 70 минут, которая распространялась со скоростью ~ 310 м/с. 16.01.2022г. ~ 2:25 UTC была зарегистрирована акустико-гравитационная волна, сформировавшаяся в результате схождения в точке антипода, прямой волны и волны, пришедшей с противоположного направления. Амплитуда волны равна ~ 230 Па, длительность ~ 80 минут, а скорость распространения ~ 308 м/с. Такие акустико-гравитационные волны являются аналогом двухмерной волны Лэмба с источником в эпицентре эксплозии и распространяются вдоль земной поверхности. Распространение таких АГВ в нижней атмосфере сопровождается лучистым теплообменом и эффектами увеличения турбулентности. Это может сопровождаться образованием неоднородностей в приземном слое атмосферы, что приводит к возмущению локальных геофизических полей. Так в период прохождения прямой акустико-гравитационной волны и антиподальной, было зарегистрировано увеличение концентрации микрочастиц в воздухе. Наблюдается хорошая временная корреляция между АГВ и вариациями концентрации микрочастиц.

Исследования выполнены в рамках госзадания

ЕГИСУ НИОКТР: 122032900185-5 "Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях" }

## **Пространственно-временная изменчивость молниевой активности и характеристик природных пожаров в разных природных зонах Западной Сибири за период 2016–2021 гг.**

---

**Харюткина Е.В., Морару Е.И., Пустовалов К.Н.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

e-mail: kh\_ev@mail2000.ru

В рамках данной работы проводится анализ пространственно-временной изменчивости распределения очагов пожаров и молниевой активности для разных природных зон Западной Сибири (50-70 с.ш. и 60-90 в.д.) за март-октябрь 2016-2021 гг.

Данные о молниевых разрядах получены из Всемирной грозопеленгационной сети (WWLLN), а о местоположении очагов возгораний и площадей лесных пожаров - из Fire Information for Resource Management System (FIRMS)). Разделение территории Западной Сибири на природные зоны производилось в соответствии с преобладающим типом растительности (MODIS Land Cover images).

Выявлено, что наибольшее количество возгораний наблюдается в центральной части Западной Сибири, при этом очаги возгораний и районы грозовой активности чаще всего совпадают вблизи Обской губы, вблизи Ханты-Мансийска, Кемерово и в Алтайском крае. В центральной части Западной Сибири наибольшее сходство наблюдается почти каждый год изучаемого периода. Причем молнии здесь значительно интенсивнее, чем в других частях региона. Результаты исследования позволяют выявить районы с наибольшей опасностью возникновения пожаров в результате молний. При этом в дальнейшем в этом сравнении стоит учитывать и другие климатические параметры, такие как атмосферные осадки, температурно-влажностные характеристики воздуха и почвы. Это важно для комплексного анализа условий, приводящих к образованию «сухих» гроз, а также для разработки методики оценки пожарной опасности в различных природных зонах Сибирского региона, что позволит принять своевременные меры адаптации к изменяющимся природным условиям окружающей среды

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 22-27-00494, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00494>.



## Особенности развития сдвиговых зон по данным математического моделирования поля напряжений и дешифрирования топокарт

---

Лермонтова А.С., Сим Л.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: alermontova@mail.ru

Согласно многочисленным натурным и экспериментальным данным, деформационные процессы в зонах сдвига на начальной стадии, до образования магистрального разлома, проявляются, как правило, в виде структур второго порядка, самыми типичными из которых при внешнем сжатии являются системы сколов Риделя и сопряжённых сколов Риделя. При этом в некоторых случаях после образования системы сколов Риделя сразу возникают соединяющие их нарушения и следом за ними сразу магистральный разлом, а в некоторых зонах сдвига так и остаётся на стадии системы отдельных сколов. В настоящей работе изучается вопрос, возможно ли по существующей системе сколов понять, насколько опасна данная зона сдвига с точки зрения образования магистрального сдвига без увеличения внешней нагрузки.

При помощи приближённого аналитического метода рассчитываются параметры напряжённого состояния в зоне эшелона сколовых трещин (сколов Риделя), образовавшихся при сдвиговой нагрузке в условиях сжатия, при различных значениях угла внутреннего трения среды, коэффициента кинематического трения на бортах сколов и расстояния между соседними сколами относительно характерного размера скола. Полученные результаты показывают, что при некоторых значениях параметров между сколами возникают зоны повышенного кулоновского напряжения, ориентация главных напряжений в которых предопределяет развитие новых нарушений, соединяющих исходные сколы, и, как следствие, образование магистрального разлома. В других случаях выраженные зоны повышенного кулоновского напряжения появляются в области концов сколов, и локальная ориентация осей главных напряжений указывает на возможность прорастания сколов в прежнем направлении. При фиксированных значениях угла внутреннего трения и коэффициента трения на бортах сколов основным параметром, влияющим на образование зон повышенного кулоновского напряжения между соседними сколами и, следовательно, соединяющих нарушений, является характерное расстояние между соседними R-сколами.

Зависимость возможности образования магистрального разлома от частоты расположения сколов качественно подтверждается результатами дешифрирования мегатрещин на топокартах. Сопоставление изолиний плотности дешифрированных мегатрещин определённой ориентировки с расположением распознанных протяжённых разломов показывает, что наибольшая плотность близконаправленных мегатрещин наблюдается именно вблизи крупных разломов. В том же районе наблюдаются вытянутые участки в меньшей степени повышенной плотности мегатрещин, которые могут рассматриваться как системы субпараллельных сколов, и в которых не обнаружено признаков магистрального разлома. Последние системы сколов без магистральных разломов представляют собой зоны сдвига с нереализованным магистральным смещением.

## **Афтершоки объявленных подземных взрывов, проведенных на полигоне КНДР и обнаруженные методом кросс-корреляции волновых форм в период между 2013 и 2022 гг.**

---

**Китов И.О., Санина И.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динами геосфер им. академика М.А. Садовского, Москва, Россия

e-mail: iasanina51@gmail.com

В данной работе под афтершоками понимается активность невзрывного характера, протекающая позже по времени и не противоречащая гипотезе о близости к эпицентру подземного взрыва в пределах 1-2 км. Первый афтершок подземного взрыва на полигоне КНДР был обнаружен методом кросс-корреляции волновых форм (ККВФ) 11 сентября 2016 г., через два дня после пятого испытания (КНДР5). Десятки афтершоков были построены аналитиками (Международный МЦД в интерактивном анализе после КНДР6. Дополнительные афтершоки КНДР6 были обнаружены методом ККВФ, и многие из них позже были подтверждены интерактивным анализом. Серия сильных афтершоков после КНДР5 и КНДР6 позволила разработать мультимастерный метод на основе ККВФ и применить его к данным на станциях MCM KSRS и USRK. Десятки новых афтершоков КНДР5 и КНДР6 были обнаружены в ходе комплексной повторной обработки данных начиная с 2009 г., причем самые последние и большие по магнитуде события наблюдались в феврале 2022 г. Мы также обнаружили афтершоки КНДР3 (12 февраля 2013 г.) и КНДР4 (6 января 2016 г.). В период с января 2009 г. по февраль 2013 г. не было обнаружено ни естественных, ни техногенных сейсмических событий с формой волны, аналогичной наблюдаемой для афтершоков взрывов в КНДР. Афтершоки КНДР3 и КНДР4 также были подтверждены интерактивным анализом. В настоящее время методом ККВФ обнаружено более 100 афтершоков КНДР, при этом относительные положения, оцененные по данным двух станций, не противоречат гипотезе о близости к эпицентрам взрывов КНДР в пределах 1-2 км. Точная оценка относительного местоположения взрыва КНДР-6 необходима для анализа механического взаимодействия между подземными полостями и разрушающимися дымовыми трубами. Механика процесса этого взаимодействия, сопровождаемого выбросом сейсмической энергии, важна не только для теоретического рассмотрения, но и для практических приложений, связанных с проблемами безопасности и сейсмической локации.

## Влияние вулканизма на изменение напряженного состояния в коре зон субдукции

---

**Ребецкий Ю.Л.**

Федеральное бюджетное государственное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия

e-mail: reb@ifz.ru

Многочисленные обзоры показывают, что периоды активизации вулканической деятельности не совпадают с периодами возникновения наиболее сильных землетрясений этих регионов. Также известно, что вкрест зон субдукции, сосуществующих с областями активного вулканизма, напряженное состояние неоднородно (например, Камчатки, Суматры и др.). При этом в настоящее время нет понимания взаимосвязи изменений сейсмического режима и режима вулканизма.

Известно, что в зонах субдукции основным является режим горизонтального сжатия, который действует во всем сейсмическом диапазоне коры. Важно отметить, что после Великого Японского или Тохоку землетрясения  $M=9.1$  (2011 г) произошли кардинальные изменения напряженного состояния в верхней части коры очаговой области. Наши исследования показали, что уже более 10 лет здесь имеет место режим горизонтального растяжения, что является следствием происходящих землетрясения с механизмами сбросового типа. Изменение режима горизонтального сжатия, которое действует в зонах субдукции на горизонтальное растяжение, очень редкое явление даже для мегаземлетрясений. Так, после Суматро-Андаманского  $M=9.0$  (2004 г) и Чилийского – Мауле  $M=8.8$  (2010 г) мегаземлетрясений такого явления в больших объемах коры не происходило. При этом, конечно, в результате и этих землетрясений происходит уменьшение уровня горизонтального сжатия в сравнении с литостатическим (вертикальным) давлением.

Проблема вулканизма по механизму формирования условий, благоприятствующих продвижению магмы по субвертикальным штокам, близка к проблеме развития даек. Согласно результатам большого числа исследований известно, что субвертикальные плоские дайки располагаются ортогонально к оси наименьшего горизонтального сжатия. Сюда также следует добавить, тот факт, что продвижение даек наблюдается в направлении действия напряжения наибольшего сжатия.

Эти положения позволяют с тектонофизических позиций дать прогноз развития стадий вулканизма, развивающегося в зонах субдукции. Начало активизации вулканической деятельности должно происходить после ослабления напряжений горизонтального сжатия, действующих ортогонально простиранию зоны субдукции. Это обычно, происходит в результате сильных землетрясений межплитного типа. В зависимости от того, как изменяется напряженное состояние коры, магма получает возможность подниматься вверх либо из коровых, либо из мантийных магматических очагов.

Тектонофизика вулканической активизации определяет, что давление магмы в коровых и мантийных очагах близко к уровню среднего – изотропного давления. Продвижения магмы вверх по плоским трещинам и штоковому каналу происходит за счет сил плавучести, поскольку расплавленная магма имеет плотность меньшую, чем плотность окружающих пород. Во фронте продвигающейся магмы ее давление должно быть выше бокового сжимающего напряжения. Таким образом, ниже фронта магмы в породах, окружающих канал или магмоподводящий разлом, повышается уровень напряжений горизонтального сжатия до уровня давления магмы.

Когда разница между напряжениями сжатия в горизонтальном и вертикальном направлении небольшая, то повышение уровня горизонтального сжатия с определенных глубин будет приводить к изменению геодинамического режима напряженного состояния с горизонтального растяжения к горизонтальному сжатию.

В докладе будут показано, что вулканизм и сильные землетрясения представляют собой определенную взаимосвязанную динамо-пару, позволяющей производить колебательные изменения уровня горизонтального сжатия в зонах субдукции.

## Роль экзогенных геодинамических процессов в формировании напряженного состояния внутриконтинентальных орогенов

---

Ребецкий Ю.Л., Мягков Д.С.

Федеральное бюджетное государственное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия

e-mail: reb@ifz.ru

В докладе обсуждаются вопросы механизма генерации напряжений повышенного горизонтального сжатия в коре внутриконтинентальных орогенов. Стандартно считается, что существующий здесь повышенный уровень напряжений горизонтального сжатия обусловлен движениями литосферных плит, например, напряжения Алтая вызываются давлением со стороны Индийской плиты, расположенной на удалении в несколько тысяч километров. Эти архаичные взгляды базируются на давно сформулированных представлениях на генезис сил, определяющих движение литосферных плит. Но современные сейсмологические, геофизические и тектонофизические данные противоречат этим взглядам.

В частности, установлено, что давление со стороны океанской зоны спрединга не является ведущей силой движения океанской плиты. Ее погружение под континентальную или субконтинентальную плиту обусловлено действием силы тяжести со стороны погруженной и утяжеленной в результате метаморфизма ее части. В силу этого в литосфере океанской плиты имеет место режим горизонтального растяжения и при этом ортогонально простиранию желоба действует напряжение наименьшего сжатия. Результаты тектонофизической реконструкции напряжений показывают, что в коре островной дуги (например, Японские острова) или континентальной литосфере (например, Южная Америка) в условиях режима горизонтального сжатия уровень этих напряжений выше литостатического давления на 30-50 бар, что очень мало. Именно из-за этого низкого уровня горизонтального сжатия и произошла инверсия напряженного состояния в верхней части коры (до 30 км) в очаговой области Тохоку землетрясения ( $M=9.1$ , 2011 г).

С другой стороны, тектонофизическая инверсия природных напряжений, выполненная из сейсмологических данных в орогенах Алтая-и Саян, показала, что здесь горизонтальное сжатие превышает вертикальное (литостатическое давление) в среднем на 300-500 бар, что много больше, чем в зонах субдукции.

Наши исследования показывают, что источником напряжений горизонтального сжатия большой интенсивности в коре орогенов альпийского типа являются экзогенные процессы. По данным фишен-трекового анализа образцов пород, находящиеся сейчас на склонах хребтов несколько млн лет назад были на глубина 3-5 км и более. В условиях этих глубин порода находится в закритическом состоянии и здесь в результате трещинного вертикального уплотнения горизонтальное сжатие в 1.5-2.5 раза превышает уровень напряжений горизонтального сжатия чисто упругого состояния (1/3 от литостатического давления). После того как эта порода постепенно в результате эрозии склонов выводится на поверхность, происходит частичная разгрузка горизонтального сжатия. При этом дополнительно сжатие, возникшее в закритическом состоянии, сохраняется. Это приводит к тому, что в верхней части коры возникает состояние горизонтального сжатия и при этом вблизи поверхности наблюдается горизонтальное расширение породы.

Дополнительный эффект в формировании горизонтального сжатия в орогенах создается за счет вулканической деятельности. В периоды магматической активизации подъем магмы происходит в тех зонах, где уровень горизонтального сжатия ниже уровня давления магмы в субвертикальных штоках или разломах. Соответственно, поднятие магмы вверх означает, что ниже ее фронта распространения уровень напряжений горизонтального сжатия поднимается до уровня давления магмы.

В докладе будут показано, что процессы формирования поля напряжений внутриконтинентальных орогенов связаны с тектоникой и глубинной геодинамикой этих регионов, а не с далекодействующими процессами.

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

---

**Овчинников В.М., Усольцева О.А.**

Федеральное государственное учреждение образования и науки Институт динамики геосфер им.

М.А.Садовского РАН, Москва, Россия

e-mail: ovtch1@yandex.ru

Сейсмические явления на Земле определяются многими сложно взаимосвязанными эндогенными и экзогенными процессами, происходящими, в частности, в результате вулканической деятельности. 15 января 2022 г произошло извержение вулкана на архипелаге Тонга, сопровождавшееся акустическими возмущениями в атмосфере, электрическом и магнитном поле Земли. Изучению связанного с извержением изменений сейсмического процесса и оценка энергетических параметров и структуры волнового поля по сейсмическим данным составляет предмет настоящей работы. В качестве исходных данных использованы каталог землетрясений международного сейсмологического центра и сейсмограммы Центра управления данными корпорации IRIS. Проведенный анализ каталога показал, что в результате извержения произошла активизация сейсмической активности, а именно: из 145 землетрясений в январе 2022 г. 134 землетрясения произошли после извержения и только 11 до извержения. Очаги землетрясений после извержения расположены на площади около 6183 км<sup>2</sup> и глубиной менее 10 км. Анализ сейсмограмм, зарегистрированных широкополосными каналами (ВН, VН) мировой системы наблюдений, позволяет визуально выделить ряд сейсмических возмущений. В первую очередь – это поверхностные волны с Рэлея со средним периодом колебаний 23 с, хорошо прослеживаемые на расстояниях до 100 градусов. Групповая скорость волн Рэлея составляет 3.6-3.8 км/с. Рассчитанная по ним магнитуда на станциях в основном с океаническими трассами распространения  $M_s \sim 5.52$  (по данным USGS на большем числе станций  $M_s \sim 5.8$ ), а соответствующая ей сейсмическая энергия с использованием известных эмпирических зависимостей составила порядка  $E_s = (1-7) \times 10^{13}$  Дж, а скалярный сейсмический момент  $M_0 = 2.4 \times 10^{17}$  Дж. Для сейсмической энергии близкий результат был также получен при расчете, используя полную запись волн Рэлея. Например, на станции YSS (Уссурийск, расстояние 77 градусов) оценка сейсмической энергии  $E_s = 2.5 \times 10^{13}$  Дж. На сейсмических каналах с полосой частот от 0.0003 до 0.1 Гц на ряде станций обнаружены два других типа колебаний. Для первого скорость распространения возмущения, измеренная на 6 станциях, лежит в диапазоне 0.28-0.37 км/с с характерным периодом 400 с. Этот тип возмущений связан с гравитационным откликом сейсмометра на акустическое возмущение в атмосфере. Для второго типа сейсмических возмущений скорость распространения составляет 0.21-0.26 км/с с характерными периодами 550 с на горизонтальных компонентах сейсмоприемников. Этот тип сейсмических возмущений, вероятно, обусловлен волной цунами и ее заплеском на побережье.

# Результаты мониторинговых исследований процессов межгеосферного взаимодействия в тектонических узлах севера Русской плиты

---

**Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова Уральского отделения РАН, Архангельск, Россия

e-mail: kutinov@fciarctic.ru

Авторами для обобщения данных многолетних мониторинговых наблюдений были созданы модели межгеосферного взаимодействия на уровне: мантия-литосфера; фундамент-осадочный чехол-современный рельеф; литосфера-атмосфера и, частично, ионосфера.

В целом, авторами были проведены исследования 18 тектонических узлов первого порядка на площади Архангельской области. В состав исследований входили:

- анализ геолого-геофизических материалов;
- цифровое моделирование рельефа кровли фундамента и поверхности современного рельефа;
- мониторинговые наблюдения количественных характеристик абиогенных (электромагнитная эмиссия, атмосферное давление, подток глубинных газов, скорость выпадения твердых и жидких осадков и т.п.) и биогенных (структура и состав растительного покрова, содержание химических элементов в почвах и растительном покрове) процессов в тектонических узлах.

Привлекались также данные сейсмотомографии по территории Канадской алмазоносной провинции для уточнения глубинного строения узлов.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что глубинность тектонических узлов имеет 400 и более км. Они отражаются в пониженных значениях температуры в литосфере и астеносфере, с глубины, как минимум, 200 км и практически до дневной поверхности; в значениях теплового потока; в структуре потенциальных полей; в строении поверхности Мохо и кристаллического фундамента; в мощности слоев земной коры; в современном геодинамическом режиме, в макросейсмическом поле, дегазации и ионизации атмосферы (вплоть до ионосферы). Строение тектонических узлов имеет фрактально-подобную (древовидную) структуру, схожую со структурой адвективных поднятий и диапиров мантийных астенолитов.

На площади тектонических узлов наблюдается коррелирование структуры глубинных слоев земной коры в фундаменте, осадочном чехле и современном рельефе, а также в структуре и свойствах растительного покрова. Эти процессы объясняются геодинамическими процессами, глубинной дегазацией и возникновением наведенных магнитотеллурических токов в земной коре. Межгеосферное взаимодействие в районах тектонических узлов отражается и структуре атмосферы и, частично, ионосферы. В результате измерений атмосферного давления над тектоническими узлами был установлен факт постоянного «дефицита» атмосферного давления. Нами была зафиксирована повышенная плотность гроз в районах тектонических узлов, а также искажение сигналов GPS.

Данное научное направление имеет прогностическое значение при геоэкологических исследованиях. Полученные результаты важно учитывать при разработке и анализе геоэкологических исследований разного масштаба и мониторинге современных геоэкологических рисков.

Работа выполнена в ходе выполнения государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН № гос. регистрации 122011300380-5.



# Фрактальная геометрия континентальных осадочных бассейнов

Леонов М.Г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Российской академии наук, Москва, России

e-mail: mgleonov@yandex.ru

Геометрия объектов занимает одно из центральных мест в моделях природных процессов. В 1982 г. Франко-американский математик Бенуа Мандельброт ввел в обиход понятие «фрактал» и «фрактальная геометрия» [6]. Строгого и полного определения фракталов пока не существует. Сам Мандельброт, предложил несколько определений понятия «фрактал», и в конце концов предложил использовать наиболее простое определение: «фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в некотором смысле подобны целому» (цитата по [3], стр. 19). В этом докладе речь идет о фрактальной геометрии седиментационных бассейнов (в дальнейшем ОБ). Обсуждение вопроса основано на рассмотрении природных геологических объектов.

Изучение внутриконтинентальных осадочных бассейнов – приоритетное направление современной геологии, и здесь достигнуты большие успехи [2; 4]. Изучение ряда структур (протерозойские Онежская и Оршанская впадины, палеозойский Мичиганский бассейн, мезозойские и кайнозойские впадины Тянь-Шаня, Зондского шельфа, Предкавказского прогиба, Эль-Рифа) выявило фундаментальное свойство ОБ, а именно дифференциацию первичных осадочных ванн на систему вторичных антиклинальных (поднятия) и синклинальных (прогибы) линейных морфоструктур. Переменяемость поднятий и впадин пространственно упорядочена: осевые плоскости структур первого порядка располагаются с шагом 150–250 км, осевые плоскости структур второго порядка имеют шаг от 15–25 до 30–50 км. Известны примеры делимости более высоких порядков. Так, во многих регионах фундамент представлен глубоко дезинтегрированными (тектонически гранулированными) гранитами, инфраструктура которых представлена ромбоэдровидными ячейками мега-, макро-, мезо- и микро-масштабов.

Разнопорядковые бассейновые структуры обладают сходным строением, упорядоченностью пространственного расположения и геометрического рисунка [1]. В известном смысле они являются самоподобными объектами, иными словами, объектами, в точности или приближённо совпадающими с частью самих себя (целое имеет ту же форму, что и одна или более частей этого целого). Самоподобие же есть характеристическое свойство фракталов [3] и указывает на фрактальный характер внутренней структурной делимости осадочных бассейнов. Это положение подтверждено существованием структур, сходных с так называемыми вязкими пальцами (*viscous fingers*), имеющими фрактальную природу [7]. Понятие было введено [5] для обозначения процесса вытеснения более вязкой жидкости менее вязкой в гранулированной среде и широко используется, в частности, в нефтяной геологии. Поведение вещества рассматривается при этом в рамках законов гидродинамики. Приведенные данные свидетельствуют: (1) разномасштабные структурные формы ОБ самоподобны, что делает правомерным предположение об их фрактальной природе; (2) наличие структурно-кинематических признаков реидного течения пород фундамента ОБ и формирование структур типа вязких пальцев допускает рассмотрение «твердых» кристаллических пород в качестве объектов гидродинамических.

Литература

1. Леонов М.Г. Тектоника консолидированной коры / Ред. Гаврилов Ю.О. М.: Наука, 2018. 458 с.
2. Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция / Ред. Леонов Ю.Г., Волож Ю.А.. М.: Научный мир, 2004. 526 с.
3. Федер Е. Фракталы. Перевод с англ. М. УРСС: ЛЕНАНД, 2014. 264 с.

4. Allen P., Allen J. Basin analysis: principles and application // Blackwell Sci. Publ. Oxford. 1990. 462 p.
5. Engelberts W.F., Klinkenberg L.J. Laboratory experiments on the displacement of oil by water from packs of granular material // Petr. Congr. Proc. Third World. P. 544–554.
6. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. W.H. Freeman, New York, 1982. 468 p.
7. Måløy K.J., Feder J., Jøssang T. Viscous fingering fractals in porous media // Phys. Rev. Lett. 1985. Vol. 55. P.2688–2691.

## Математическое моделирование нестационарных процессов в сейсмоактивной зоне

---

Ким А.С. (1), Шпади Ю.Р. (2), Литвинов Ю.Г. (3)

(1) Казахстанский научный центр Международной академии наук Евразии, Алматы, Казахстан

(2) Институт математики и математического моделирования, Алматы, Казахстан

(3) Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан

e-mail: kim.as@mail.ru

Процессы фазового перехода больших объемов горных пород перед землетрясениями из ненарушенного состояния в состояние динамического разрушения в условиях сжатия на больших глубинах происходят замедленно, что может быть использовано в прогностических целях [1]. По естественным волноводам, которыми являются разломные зоны, эти процессы вызывают вариации геофизических полей на земной поверхности, изменения параметров ионосферы, которые могут быть замечены современными наземными и спутниковыми наблюдениями. В настоящем докладе приведены результаты математического моделирования динамических и квазистатических процессов в очаговых зонах землетрясений. Исследовано движение упругой среды при внезапном возникновении разрыва вдоль конечной полосы в условиях продольного сдвига с учетом контактного вязкого трения. Использование точного решения этой задачи, построенного методом суперпозиции [2], удобно для первых вступлений отраженных волн, но затруднено при многократных отражениях. В связи с этим в данной работе рассмотрен иной подход, заключающийся в сведении краевой задачи к интегральному уравнению Фредгольма 2-го рода в изображениях, решение которого при определенных условиях позволяет получить параметры движения среды в произвольный момент времени. Этими условиями является достаточно большая величина вязкости  $\eta$  на разрыве (при  $\eta > \eta^*$ ), когда реализуется нестационарный квазистатический процесс. Из условий близости приближенного (квазистатического) решения и общего (динамического) решения интегрального уравнения, получена оценка величины параметра  $\eta^*$ . С помощью аналитических методов совместно с численным счетом получены графики нестационарных смещений берегов разрыва и концентрации напряжений на его концах в произвольный момент времени для больших величин вязкого взаимодействия берегов разрыва. Получено общее решение квазистатической задачи в виде статической поверхности в нормированной системе координат.

1 Ким А.С. Механика нестационарных процессов в очаговых зонах земной коры. – Алматы: Ғылым ордасы, 2017. – 282 с. / ISBN 978-601-80618-2-0

2 Ким А.С. Математическое моделирование динамических процессов в литосфере при внезапном возникновении разрыва // Известия НТО «КАХАК». – 2016. – № 2 (53). – С. 53-64.

## Коррекция плазмохимической модели D-области ионосферы по данным распространения сигналов СДВ-диапазона

---

**Беккер С.З.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: susanna.bekker@gmail.com

К настоящему моменту нижняя ионосфера Земли остается наименее изученной в связи со сложностью экспериментальных измерений и большим количеством протекающих в ней фотохимических процессов. Несмотря на то, что большое количество отечественных и зарубежных работ посвящено исследованию состояния D-области ионосферы, точность прогноза поведения ионосферных параметров в условиях возмущений различной природы все еще остается достаточно низкой. Поэтому вопрос построения плазмохимической модели, которая позволит корректно численно описать вариации ионосферных параметров в спокойных условиях и под действием возмущений, все еще открыт.

Известно, что амплитудно-фазовые характеристики сигналов СДВ-диапазонов, распространяющихся в волноводе Земля-ионосфера, очень чувствительны к колебаниям концентрации электронов, вызванным возмущениями различной природы, такими как солнечные рентгеновские вспышки, магнитосферные бури, высыпания заряженных частиц и т.д. Этот факт позволяет использовать данные наземных радиофизических измерений не только для верификации, но и для коррекции используемых схем ионизационно-рекомбинационного цикла и плохо известных значений входных параметров моделей. Наименее известными из них являются концентрации малых нейтральных составляющих и значения констант скоростей реакций.

В данной работе проводится расчет динамики параметров D-области ионосферы во время рентгеновских вспышек с различным набором неизвестных, но физически корректно заданных, входных параметров плазмохимической модели. Полученные результаты верифицируются по данным наземных радиофизических измерений, накопленных в геофизической обсерватории Михнево (55°N 38°E). Восстановление значений неточно заданных констант скоростей реакций по экспериментальным данным распространения радиоволн позволяет повысить точность расчета концентрации электронов в различных гелиогеофизических условиях.

## Влияние дождя на движения земной поверхности

---

Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Мигунов И.Н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта  
Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: sobolev@ifz.ru

Исследованы отклонения скорости вертикальных колебаний земной коры по данным широкополосных сейсмических станций от теоретических значений земных приливов. Эти отклонения сопоставлены с информацией о метеорологических условиях в местах расположения станций. Выбраны сейсмические станции в северной Америке, расположенные возле метеорологических станций. Проанализированы интервалы времени, когда не было перерывов в ежесекундных сейсмических записях. Выявлены изменения в амплитудах вертикальных движений земной поверхности при дождях. Они достигали 50 % от ежесуточных вариаций земных приливов и длились на протяжении одних – двух суток. Физика возникновения аномалий в движениях, вызванных метеорологическими условиями, может быть описана такой гипотетической схемой. Динамические процессы в атмосфере вызывают иногда понижение атмосферного давления в районе расположения сейсмической станции. Следствиями являются движения земной поверхности, изменения структуры порового пространства и рост проницаемости приповерхностных слоев горных пород. Приход облаков из соседних районов вызывает дождь. Проникновение воды в поровое пространство и смачивание широкого спектра минералов приводит к появлению эффекта Ребиндера. Происходят процессы образования новых трещин и движения поверхности земли. Их амплитуды не связаны с увеличением веса и толщины слоя выпавших дождевых осадков. Последние в изученных случаях были порядка 20 мм, тогда как величина изменений в приливах составляла сотни мм. Явление гипотетически объясняется уменьшением прочности горных пород, увеличением их хрупкости и трещиноватости вследствие эффекта Ребиндера. Дождь играет роль триггера, высвобождающего накопленную в земле энергию.

## Исследование возможного влияния взрывов на режим землетрясений в Турции

---

**Владимир Ж.И.**

Институт физики Земли им. О.Ю Шмидта , Москва, Россия

e-mail: vladimirzhuravlevtver53@yandex.ru

На основе совместного анализа каталогов землетрясений и взрывов Турции рассматриваются возможные эффекты влияния промышленных взрывов на сейсмические проявления. Использован материал, предоставленный обсерваторией Кандили (Boğaziçi University Kandilli Observatory) и региональным Центром мониторинга землетрясений и цунами (Earthquake Research Institute - Regional Earthquake-Tsunami Monitoring Center). Рассмотрены гипотезу взаимной засоренности каталогов и триггерного механизма влияния взрывов на землетрясения. Анализируются особенности временного и пространственного распределения относительного положения взрывов и землетрясений в различных модификациях. Для оценки значимости обнаруженных результатов используется метод создания искусственных каталогов и статистика взаимного влияния взрывов на землетрясения и обратно. Привлечение достаточно сложных математических алгоритмов позволило получить результат предполагаемого возбуждения землетрясений взрывами на расстояниях до 8 км для ограниченного числа взрывов от 33 до 512 в зависимости от выбранного временного критерия запаздывания землетрясений от возбуждающего их взрыва, что составляет малую часть сейсмических событий в использованных каталогах. Кроме того, установлен обратный эффект в виде ослабления сейсмичности на расстояниях 12-15 км между сопоставляемыми событиями. Он может быть понят как возможное свидетельство снятия тектонических напряжений в ближайшей окрестности активного проведения групп взрывов. Примером ошибки в каталогах или взаимовлияния взрывов и землетрясений может служить обнаружение кластера, где в течение последних 7 лет плотность проведения взрывов была максимальной, что сопровождалось практически полным прекращением землетрясений в ближайшей окрестности кластера (до расстояний 25 км). Установлены общие особенности суточных рядов взрывов и землетрясений, которые могут быть как свидетельством действия взрывов на землетрясения, так и ошибки определения типа события – взрыв-землетрясение. В данном случае предполагается другой механизм воздействия- уменьшение числа взрывов о обеденное время и увеличение числа землетрясения в это же время.

# Эффективность флюидного и электрического триггерного воздействия на зоны модельного разлома земной коры с различным уровнем акустической эмиссии

---

Новиков В.А., Окунев В.И., Ключкин В.Н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: novikov@ihed.ras.ru

В результате выполненных в последнее время экспериментальных и теоретических работ показано, что режим деформирования разлома земной коры и накопления напряжений до критических значений, при которых происходит динамический разрыв разлома, определяется зонами соприкасающихся неровностей бортов разлома, получивших в сейсмологии общепринятое название "asperities". В таких зонах при приближении в них сдвиговых напряжений к критическим значениям будет наблюдаться рост трещинообразования, сопровождаемый акустической эмиссией (АЭ). В лабораторных экспериментах на пружинно-блочных моделях сейсмогенного разлома с использованием регистрации АЭ и локации источников АЭ можно выделить зоны asperities и определить их чувствительность к локальным внешним триггерным воздействиям, которые могут привести к инициированию динамической подвижки борта модельного разлома (лабораторному "землетрясению"). В данной работе представлены результаты исследований инициирования лабораторного "землетрясения" при триггерном воздействии на зоны пружинно-блочной модели разлома земной коры с различным уровнем АЭ. Эксперименты выполнены на подвижном блоке длиной 700 мм при нормальном напряжении в модельном разломе 24,4 кПа и максимальном сдвиговом напряжении до 14,0 кПа. В процессе медленного сдвигового нагружения подвижного блока со скоростью 0,033 Н/с через пружину с жесткостью 16,6 Н/мм определялось распределение плотности источников АЭ по длине межблочного контакта по трем датчикам АЭ, расположенных равномерно на внешней поверхности подвижного блока. При достижении сдвигового усилия на уровне 99 % от критического значения, при котором происходит динамический срыв подвижного блока, электромеханический привод, обеспечивающий рост сдвиговых напряжений в межблочном контакте, выключался, и производилось триггерное воздействие на межблочный контакт подачей воды или электрического тока в одну из его 12 зон, расположенных равномерно по длине подвижного блока. В экспериментах определено количество инъецируемой воды и уровень тока, приводящие к резкой активизации АЭ и инициированию динамического срыва блока, в зависимости от плотности расположения источников сигналов АЭ. Установлено, что минимальное количество воды, а также минимальное значение электрического тока, инициирующие динамический срыв, необходимо подавать в зону максимальной кластеризации очагов АЭ. При этом инъекция воды или подача электрического тока такого же объема или уровня в зону, где отсутствуют источники акустических сигналов, не инициирует динамический срыв подвижного блока.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН в рамках научного проекта № 21-51-53053.

## **Спектральный состав акустических сигналов образцов искусственного песчаника в условиях одноосного нагружения**

---

**Зейгарник В.А., Ключкин В.Н., Окунев В.И.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур  
РАН, г.Москва, Россия

e-mail: zeigarnik@ihed.ras.ru

Были проанализированы спектры акустических сигналов, полученных при одноосном сжатии образцов искусственного песчаника в условиях непрерывного нагружения, включая запредельные состояния вплоть до разрушения. Эксперименты проводились на рычажном прессе, ранее описанном в ряде публикаций авторов. Всего в процессе нагружения было зарегистрировано более 10 000 акустически сигналов, превышающих порог дискриминации. В спектрах акустических сигналов было выделено от 3 до 5 (в редких случаях до 7) максимумов. По мере уменьшения амплитуды максимумов соответствующим частотам присваивался ранг от 1 до 4. В случаях, когда число максимумов заметной амплитуды превышало 4 всем им начиная с четвертого присваивался ранг 4. В целом, частоты 1 и 2 рангов преимущественно группируются в довольно узких интервалах: 95 – 100 и 65 – 70 кГц. А начиная с нагрузки 0,997 от максимальной четко проявляется еще интервал частот 10-12 кГц, при том что при меньших нагрузках в этом интервале частоты 1 и 2 ранга полностью отсутствуют. Одновременно при этих предельных и запредельных нагрузках заметно падает доля частот в интервале 95 – 100 кГц, а общее распределение частот ранга 3 и 4 становится еще более диффузным. Отмеченные выше особенности распределения частот максимумов в спектрах акустических сигналов могут явиться свидетельством изменения характера образования трещин перед самым разрушением образца, и это можно рассматривать как предвестник разрушения.



# Вклад гидроизостазии в вертикальные движения и напряженно-деформированное состояние земной коры и мантии

---

**Булгаков Р.Ф.**

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

e-mail: r.bulgakov@imgg.ru

На интуитивном уровне, кажется невероятным, что изменение уровня моря на 100-130 метров, как это происходило в ледниковые периоды, в том числе и во время последнего ледникового периода, серьезно влияло на напряженно-деформированное состояние земной коры мощностью 5 до 30 км и на мантию до нижних слоев.

Однако, анализ высотного положения древних береговых линий на некоторых морских побережьях России, которые относятся к “отдаленным от ледниковых щитов” (far-field) участков, показывает необъяснимые с позиций неотектонического развития факты. Учет влияния нарушения изостатического равновесия, в данном случае – явление гидроизостазия позволяет объяснить противоречие.

По результатам изучения возраста и высотного положения голоценовых следов береговых линий, начиная с 90-х годов прошлого столетия, даже в пределах ограниченных акваторий - Японское море [M.Nakada et.al, 1990], Южно-Китайское море [B.Horton, et al, 2005] и расположенных вдали от центров покровных ледников (far-field zone) выяснилось разновысотное положение одновозрастных береговых линий.

На российских побережьях, как исследовательские районы для изучения влияния эффекта гидроизостазия на вертикальные движения земной коры были взяты побережья, расположенные далеко от центров покровных оледенений Северной Америки и Скандинавии, районы, располагающиеся в так называемой зоне – “far-field”, где нет непосредственного гравитационного влияния от покровных ледников. Это приморское побережье Дальнего Востока, побережья о.Сахалин и Охотское море, арктические моря Лаптевых и Восточно-Сибирское. Некоторые из этих морей лучше, другие хуже изучены палеогеографическими методами.

Большой вклад в изучение влияния послеледникового таяния покровного оледенения и хода трансгрессии Мирового океана на вертикальные движения земной коры был внесен после развития современных вычислительных возможностей. В данной работе были использованы программные пакеты с открытым кодом и в свободном доступе SELEN и ELMER.

Следующие полученные результаты обсуждаются в работе:

- Изменение уровня моря на 120 метров на отрезке времени 17-20 тыс.лет может заметно влиять и, даже, изменять доминирующий тренд в вертикальных тектонических движениях в регионе.

- От ширины шельфа, подвергнутого разгрузке и нагружению водным столбом в 100-120 метров зависит скорость вертикальных движений твердой поверхности дна, побережья и суши на расстояниях в сотни километров от акватории, на которых проявляется эффект гидроизостазии.

- “Te” - толщина эффективная литосферы, в зависимости от ее реологических свойств, которые, обычно, ниже свойств подлежащей мантии, влияет обратно пропорционально на величину амплитуды вертикальных движений, чем толще слой литосферы, тем больше амплитуда вертикальных движений.

- Деформации в мантии, в результате относительно небольших значений давления на поверхности литосферы убывающей или прибывающей воды в результате межледниковых изменений уровня океана с максимальным значением 1200 кПа достигают глубин нижней мантии на временных интервалах в несколько тысяч лет.

- Расстояния, на которые распространяются деформации противоположного знака от места воздействия нагружением толщей воды достигают сотен и тысяч километров.
- Амплитуда вертикальных движений, заметно отличаются в смежных с мысами заливах с протяженностями 100 и более километров.
- Для тектонически активных районов, такие как зоны субдукции, решающее влияние на эволюцию уровня моря имеет характер субдукции.

# **Контроль за триггерными эффектами с помощью мониторинга внутренних напряжений горных массивов в рамках упругих слоисто-блоковых моделей с включениями иерархического строения L-го ранга**

---

**Хачай О.А., Хачай А.Ю.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики УрО РАН имени Ю.П.Булашевича, Екатеринбург, Россия

e-mail: olgakhachay@yandex.ru

В настоящей работе представлен обзор работ, в которых интенсивно развиваются новые модели механики сплошных сред, обобщающие классические теории упругости. Эти модели находят применение для описания композитных и статистически неоднородных сред, новых конструкционных материалов, а также для сложно построенных массивов в шахтных и наземных условиях, а также при изучении явлений, происходящих в мерзлоте под действием процессов оттаивания. Характерным отличием теории сред с иерархической структурой является присутствие в явной или неявной форме масштабных параметров, т.е. явная или скрытая нелокальность теории. В работе основное внимание уделяется исследованию эффектов нелокальности и внутренних степеней свободы, отражающихся во внутренних напряжениях, которые не описываются классической теорией упругости и которые могут быть потенциальными предвестниками развития катастрофического процесса в горном массиве.

В последние годы интенсивно развиваются новые физические и математические модели материальных сред, которые могут рассматриваться как далеко идущие обобщения классических теорий упругости. Наука о пластичности и прочности твердых тел переживает стадию смены парадигмы. В течение длительного времени описание пластической деформации и разрушения твердых тел развивалось в рамках линейных приближений механики сплошной среды (макромасштабный уровень) и физики деформационных дефектов в нагруженном твердом теле (микромасштабный уровень). Однако в последние десятилетия стало очевидным, что деформируемое твердое тело представляет собой многоуровневую иерархически организованную систему, которая должна описываться в рамках нелинейной механики и неравновесной термодинамики. Рассмотрены фундаментальные проблемы, возникающие при применении второго закона термодинамики к анализу систем на макроскопическом и микроскопическом уровнях. Показано, что неравновесность состояния системы может стать причиной возникновения в ней порядка и что необратимые процессы могут приводить к возникновению нового типа динамических состояний материи, названных «диссипативными структурами».

Ключевые слова: иерархическая среда, акустическое поле, электромагнитное поле, итерационный алгоритм моделирования, нелокальная теория упругости, мониторинг аномальных напряженных зон, определение их положения и развития катастрофического риска.

## Тропические циклоны - триггер литосферных землетрясений

Костин В.М., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук имени Н.В. Пушкова, Москва, Троицк, Россия  
e-mail: kostin@maryno.net

Многолетние исследования вероятности землетрясений показали – они происходят в областях с наибольшим развитием деформационных процессов, что наиболее подробно отражено в работах ИТПЗ РАН [1]. На юбилейной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Академика В.И. Кейлиса-Борока, в докладе авторов [2] обсуждались спусковые механизмы литосферных землетрясений  $h > 20$  км из-за воздействия тропических циклонов (ТЦ). На примере серии ТЦ в период развития одного из сильнейших тайфунов 20 века Gay-92 показано, что литосферные землетрясения на различных разломах происходили на фазах резкого изменения интенсивности ТЦ [2]. Причем, перемещение очагов землетрясений происходило вслед за движениями ТЦ. Рассматриваются 4 механизма воздействия ТЦ на литосферные плиты:

1. Основной механизм связан с поднятием плиты в области разрежения ТЦ и опусканием границы, где из-за взаимодействия с прилегающей плитой происходят землетрясения [3].

2. Плита может наклоняться рычагом, которым служит большой океанический остров при воздействии динамического напора поверхностного ветра ТЦ. Перемещающиеся литосферные землетрясения наблюдались при прохождении ТЦ Harry-89 через остров Новая Каледония [2-3].

3. Механизм воздействия ураганов в шельфовой зоне на землетрясения подробно изучался с помощью специальных датчиков на  $\sim 2800$  сейсмостанциях США в течение более 10 лет [4]. Показано, что они сопровождаются возбуждением длинноволновых колебаний.

4. Передача воздействия ТЦ на диаметрально противоположные плиты другого полушария, по-видимому, можно объяснить эффектом антипода, как инфразвуковых, так и длинноволновых сейсмических колебаний. Так, после подземных ядерных взрывов Франции в ноябре 1991 произошла интенсификация трех тропических возмущений до пятой категории. Воздействие «фантом» тайфунов Page, Owen и Sina на землетрясения американского континента рассмотрено в работе [5].

Предполагается, что дополнение вероятностных методов прогноза землетрясений [1] эффектами взаимодействия ТЦ с литосферными плитами может улучшить прогноз.

Литература

1. Горшков А.И., Соловьев А.А., Шебалин П.Н. К 30-летию ИТПЗ РАН. 2019. 64 с. URL: <https://www.itpz-ran.ru/wp-content/uploads/2020/09/2019-ITPZ-Conference-30y-1.pdf>.

2. Kostin V., Belyaev G., Ovcharenko O., Trushkina E. Impact of typhoon Gay on lithospheric earthquakes // II All – Russian Scientific Conference with international Participation “Modern methods of seismic hazard assessment and earthquake prediction”. IEPT RAS. 2021. P. 114-115. <https://www.itpz-ran.ru/wp-content/uploads/2021/11/2021-ITPZ-Conference-Abstracts.pdf>.

3. Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. Особенности взаимосвязи тропических циклонов и землетрясений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 114-128.

4. Fan W., McGuire J. J., de Groot-Hedlin C. D., Hedlin M. A. H., Coats S., Fiedler J. W. Stormquakes // Geophysical Research Letters. 2019. 46(22). P. 12909-12918.

5. Kostin V., Belyaev G., Ovcharenko O., Trushkina E. American Continent Lithospheric Earthquakes after Nuclear Test of France in November 1990 // International Journal of Engineering Research & Science. 2021. 7(12). P. 30-34.

## Слабая сейсмичность и сильнейшие землетрясения на фоне вариаций поля поглощения S-волн

---

**Аптикаева О.И.**

Федеральное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: artikaevaoi@mail.ru

В работе рассматривается роль относительно слабых землетрясений, как инструмента изучения среды, в том числе, в процессе реализации сильных событий. Рассмотрена пространственная структура поля поглощения нескольких сейсмоактивных районов (Гармского прогностического полигона в Таджикистане, Алтая, Кавказа, Восточной Анатолии, Западного Тянь-Шаня), а также эпицентральных областей ряда сильнейших землетрясений и приуроченность к ней «заглубленной» сейсмичности. Показано, что поле поглощения, полученное по короткопериодной коде слабых землетрясений в сейсмически активных районах, неоднородно и состоит из добротных блоков и ослабленных зон сильного поглощения. Отмечается неравномерность распределения заглубленных землетрясений. Она связывается с блоковым строением: в ослабленных зонах их доля больше, чем в добротных блоках. Демонстрируются примеры вариации активности заглубленной сейсмичности в ослабленных зонах. Она варьирует во времени, увеличиваясь перед сильными землетрясениями. Приводятся факты, свидетельствующие о существовании связи между скоростью вращения Земли и активностью заглубленной сейсмичности.

Приводятся примеры активизации слабой сейсмичности в виде сейсмических роев (серий слабых землетрясений, сконцентрированных в пространстве и во времени) в связи с сильными событиями. Характерной чертой этих роевых серий является изометричность областей локализации землетрясений в плане и вытянутость по вертикали. Они, как правило, совпадают с ослабленными зонами сильного поглощения S-волн. Интенсивная локализованная сейсмичность, приуроченная к одномерным объемам, вероятнее всего, связана с каналами повышенной проводимости, по которым, мигрируют глубинные флюиды.

Активизация роевых серий является результатом активной миграции глубинных флюидов и роста флюидонасыщенности ослабленных зон. Флюиды, в свою очередь, являются катализатором процессов, приводящих к уменьшению прочности пород и разрушению блоков в эпицентральных зонах. В данном случае кластеры, к которым относятся роевые серии, могут рассматриваться как локальные сейсмогенные зоны.

Появление компактных изометричных в плане и близвертикальных в разрезе кластеров слабой сейсмичности нередко наблюдается и вне эпицентральных зон сильных землетрясений. Такие зоны могут быть просто индикаторами сеймотектонической обстановки в регионе в целом.

Предполагается, что резкое изменение динамики атмосферного давления в период подготовки сильного землетрясения на гидрометеостанциях, расположенных в таких районах, является следствием межгеосферного взаимодействия литосферы и атмосферы. Одним из основных механизмов аномального поведения атмосферного давления в процессе реализации сильных событий представляется глубинная дегазация. Она наиболее активна в ослабленных зонах. Механизмы воздействия глубинной дегазации на внешние геосферы остаются предметом дискуссий.

## **Планетарная водородная дегазация, контролирующая самоподдерживаемый триггерный сейсмический процесс в широком диапазоне глубин**

---

**Гуфельд И.Л. (1), Новоселов О.Н. (2)**

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Федеральное Государственнoе бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский Государственный университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

e-mail: igufeld@korolev-net.ru

Получены убедительные доказательства тупика разрывной модели сейсмического процесса. Основой доказательств являются реальные особенности строения и динамики геологической среды: предельная энергонасыщенность среды до границы Мохо и ее перманентная неустойчивость, отсутствие в сейсмическом процессе в литосфере актов разрушения, быстрые изменения параметров среды, наблюдающиеся в вариациях структурно чувствительных скоростей сейсмических волн в литосфере, вариации скоростей сейсмических волн в верхней мантии, периодичность глубокофокусных сейсмических событий (ГФС), быстрая реакция поверхностной литосферы на подготовку и протекание глубокофокусных сейсмических событий. Ключом к пониманию сейсмических ситуаций в литосфере и верхней мантии являлась проблема природы ГФС и их повторяемости.

ГФС не могут быть связаны с быстрыми полиморфными или фазовыми переходами в широком диапазоне глубин, а также с процессами локального накопления упругой энергии. Механическая природа ГФС в принципе абсурдна. На основе новых представлений о геологической среде была обоснована дегазационная модель сейсмического процесса, контролируемая планетарной водородной дегазацией. Предложены модели коровых сейсмических актов и ГФС. Для литосферы - это быстрые подвижки вдоль граничных структур, для ГФС - "взрывной" выброс водорода как атомов внедрения, вызывающий деформацию водородной подрешетки. Движущими силами фонового сейсмического процесса в предельно энергонасыщенной по упругой энергии литосфере являются всплывающие деформационные волны диффузионной природы, активируемые непрерывно восходящими потоками водорода, обеспечивая самоподдерживаемый сейсмический процесс. Реализуется триггерное действие водородных потоков на параметры граничных структур, которые контролируют медленные (фоновый режим) или быстрые подвижки элементов среды относительно друг друга (слабые события - в фоновом режиме). Водородная активация граничных структур переводит процесс движение элементов среды относительно друг друга в безбарьерный с чертами сверхпластичности. Подчеркнем, и это доказано, что триггерные эффекты в предельно энергонасыщенной среде только за счет силового воздействия упругих волн сейсмических источников не могут самостоятельно активизировать сейсмический процесс, так как их энергия существенно меньше энергии тепловых флуктуаций. В то же время восходящие потоки легких газов могут управляться слабыми упругими волнами микросейсм или слабых сейсмических событий во взаимодействии с лунно-солнечными приливами, что оказывает влияние на динамику фонового сейсмического процесса.

Проявления сильнейших и мега событий происходят при дополнительной активации водородным потоком граничных структур за счет локальной активизации в верхней мантии "сейсмических гвоздей" Вадковского. Для этих событий "сейсмические гвозди" Вадковского также являются триггером, изменяющим параметры граничных структур в литосфере. Эпицентральная зона

возможных сильнейших событий может быть выделена в краткосрочном периоде сейсмической опасности.

. Непрерывный восходящий поток водорода обеспечивает сейсмическое взаимодействие процессов в верхней мантии и литосфере и контролирует самоподдерживаемый сейсмический процесс в широком диапазоне глубин

Литература

Гуфельд И.Л. Сейсмическая опасность: предотвратить или предупредить. М.: "Сам Полиграфист". 2019. 98 с.

Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Сейсмичность как реакция геологической среды на планетарную водородную дегазацию. На примере Камчатского региона. М.: Издательство ООО "Сам Полиграфист". 2021. 72

# Анализ трещиноватости сложной зоны сочленения Кандалакшского и Чупинского грабенов

---

**Гордеев Н.А.**

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

e-mail: turistmsu@gmail.com

На всем протяжении неотектонической истории формирования Кандалакшского грабена он испытывал растяжение. Однако если рассматривать его подробнее, то характер развития ступеней грабена, пропагации более мелких структур видны пульсационные, дифференцированные движения. Это обширное заложение сдвиговых зон, сдвиго-сбросовых и вращательных (Балуев, 2012; Колодяжный, 2019).

Изучение характера трещиноватости Керетского архипелага и Хетоламбинского массива производилось несколькими методами: построение плотностных стереограмм в программе stereonet, методом катакластического анализа Ю.Л.Ребецкого, структурно-геоморфологическим методом Л.А.Сим (Ребецкий, 2017), реализованным в программе SimSGM (Гордеев, 2019), и парагенетическим методом структурного анализа Л.М. Расцветаева (Расцветаев, 1987).

Рассматриваемая зона является сложным сочленением поперечных грабенов разного ранга, где Кандалакшский – 1-го ранга, а Чупинский 2-го. Раскрытие 1-го подталкивает раскрытие 2-го. Большинство измеряемых геологических стресс-индикаторов отражают сдвиговые процессы, это и зеркала скольжения, и жильные структуры, и отрывы. И в небольшом количестве сбросовые движения. Все это выстраивается в чередование систем диагональных сдвигов и систем ортогональных сбросов на о.Сидоров, возраст которых отмечается, как постледниковый, первые тысячи лет. Подобная система отражает субширотное сжатие в Чупинском грабене, которое является наведенным от раскрытия Кандалакшского грабена.

Работа написана в рамках государственного финансирования ИФЗ РАН.

Список литературы:

Балуев А.С., Журавлев В.А., Терехов Е.Н., Пржиялговский Е.С. Тектоника Белого моря и прилегающих территорий (Объяснительная записка к «Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий» масштаба 1:1500000) // Тр. ГИН РАН. Вып. 597. М.: ГЕОС. 2012. 104 с.

Гордеев Н. А., Молчанов А. Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 25–33.

Колодяжный С.Ю., Балуев А.С., Зыков Д.С. Структура и эволюция северо-запада Беломорско-Северодвинской зоны сдвига в позднем Протерозое и Фанерозое (Восточно-Европейская платформа) // Геотектоника. 2019. №1. С. 62-86. Doi: 10.31857/S0016-853X2019162-86

Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М.: ГИН АН СССР. 1987. С. 173–235.

Ребецкий Ю. Л., Сим Л. А., Маринин А. В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. ГЕОС Москва. 2017. 225 с.



## Электромагнитные поля в верхней ионосфере от наземного КНЧ излучателя конечной длины

---

Пилипенко В.А. (1, 2), Федоров Е.Н. (2), Мазур Н.Г. (2)

(1) Геофизический Центр РАН, Москва, Россия

(2) Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

e-mail: pilipenko\_va@mail.ru

Теоретически рассмотрена возможность обнаружения низкоорбитальными спутниками электромагнитного отклика в верхней ионосфере от заземлённых крупномасштабных сверх-низкочастотных (СНЧ) передатчиков. В качестве примера таких мега-излучателей рассмотрены передатчик ЗЕВС на частоте 82 Гц, эксперименты FENICS по возбуждению искусственных излучений на частотах 3-100 Гц, и магистральные линии электропередач (ЛЭП) с промышленной частотой 50 Гц. Численно рассчитана утечка энергии СНЧ излучений в верхнюю ионосферу от заземленного линейного тока конечной длины  $L$ , подвешенного над высокоомной земной поверхностью. Высотный профиль параметров плазмы реконструирован с использованием модели ионосферы IRI. Для передатчика ЗЕВС ( $L=60$  км), запитываемым током 200 А, моделируемые амплитуды электромагнитного отклика в верхней ночной ионосфере могут достигать  $\sim 60$  мкВ/м. Предположение о бесконечном масштабе излучателя завышает отклик электрического поля в верхней ионосфере в 5 раз по сравнению с реальным масштабом 60 км передатчика ЗЕВС. При типичном токе 100 А во время экспериментов FENICS ( $L=100$  км) излучение с частотой 10-150 Гц может просачиваться в ночную верхнюю ионосферу с амплитудой до  $\sim 60-70$  мкВ/м. По результатам моделирования, излучение на частотах 50/60 Гц с наблюдаемой на спутниках в ночной ионосфере интенсивностью  $\sim 1$  мкВ/м может возбуждаться несбалансированным током в ЛЭП  $\sim 10$  А над земной корой с проводимостью  $10(-3)$  См/м. К настоящему времени наша планета оказалась в диапазоне 50-150 Гц в электромагнитной среде, созданной скорее промышленной деятельностью, чем естественными магнитосферными процессами. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 21-77-30010.

## Триггерные механизмы быстрой генерации и подпитки торнадо-циклона

---

Натяганов В.Л., Маслов С.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Москва, Россия

e-mail: tensor-home@yandex.ru

Для торнадо-циклона, т.е. вращающегося грозового облака, из которого обычно и формируются воронки торнадо, существуют чисто гидродинамические модели. В частности, такую модель торнадо-циклона в квазистационарной стадии можно предложить на основе аналогии с антициклоническими линзами более теплой и соленой воды, чем в открытом океане. В этом случае квазитвердое вращение торнадо-циклона поддерживается балансом сил Кориолиса и Архимеда в устойчиво стратифицированной атмосфере.

Однако известны сверхбыстрые (в течении десятка минут) случаи формирования торнадо-циклона и его дальнейшей подпитки восходящими вихрями дегазационной природы, которые описаны в монографии Д.В. Наливкина и были зафиксированы в Амурском заливе 20.09.1997 г. вблизи Владивостока.

Для моделирования подобных случаев в квазистационарной стадии существования торнадо-циклона удобно использовать магнитогидродинамическую аналогию (МАГДА) между системой уравнений равновесных МГД-конфигураций в теории управляемого термоядерного синтеза для пары магнитное поле – электрический ток и пары скорость – завихренность при стационарных течениях идеальной несжимаемой жидкости.

Первая модель торнадо-циклона подобного типа основана на алгебраическом решении уравнения Грэда-Шафранова для токамака с D-образным сечением; а вторая модель связана с решением более сложной задачи, когда задаются уравнения магнитных поверхностей тороидальной формы с учетом их слабого гофрирования, моделирующего турбулентные пульсации в торнадо-циклоне. По этим уравнениям магнитных поверхностей можно рассчитать распределения магнитного поля и плотность электротока, а затем по МАГДА получить аналогичные формулы для полей скорости и завихренности в торнадо-циклоне.

Однако в центральной зоне (“дырке” тора) эти модели торнадо-циклона необходимо дополнить неким восходящим вихрем колоннообразной формы с течением типа Громеко-Бельтрами и равенством давлений на внешней границе этого вихря и внутренней границе тора. В этом восходящем вихре дегазационной природы важную роль играют гидратированные кластерные ионы, которые являются эффективными центрами конденсации, что и обеспечивает (фактически без участия сил Кориолиса) быструю генерацию торнадо-циклона, из которого затем могут образоваться классические воронки торнадо. Следовательно, такой торнадо-циклон для восходящих вихрей является потомковым грозовым облаком, а для возникших затем воронок торнадо – материнским.

Для построения моделей формирования из такого торнадо-циклона воронок торнадо необходимо учитывать и возрастание на 2-3 порядка атмосферного электрического поля под торнадо-циклоном, что ранее уже рассматривалось в ряде работ авторов данного доклада.

## Модели функционирования сейсмогвоздей

---

**Натяганов В.Л.**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Москва, Россия

e-mail: tensor-home@yandex.ru

Рассматриваются признаки и свойства “сейсмических гвоздей”, которые представляют собой субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений, расположенных на глубинах 20-80 км с эпицентральной проекцией диаметром в 5-10 км и аномально малым временем (1-4 недели) формирования.

В ряде публикаций основной причиной подобных структур называлась глубинная дегазация легких газов (водорода, гелия) в виде всплывающих мантийных плюмов. Не касаясь вопросов о геохимическом влиянии мантийных флюидов на земные недра, перечислим основные геофизические факты.

1. Главной особенностью водорода, растворенного в минералах верхней мантии, является его аномально высокая подвижность.

2. Нагретый водород является эффективным теплоносителем - при его движении в сплошной среде сильно нагреваются диффузионные каналы.

3. Водорода в среде снижает поверхностную энергию, поэтому эти диффузионно-тепловые каналы становятся аналогом площадок скольжения (микротрещинами), которые могут перерасти в макротрещины большой длины.

4. Аморфизированная (насыщенная водородом) среда имеет на 30-50 % меньшие значения модулей Юнга и сдвига, но большую плотность.

Этот перечень свидетельствует, что создать количественную модель, адекватно описывающую свойства сейсмогвоздей на микро- и макроуровнях, вряд ли возможно.

Однако модели, описывающие на качественном макроуровне сейсмогвозди и ряд их свойств 1-4, можно предложить на основе аналогии процессов массо- и теплообмена. Учитывая аномально быстрое формирование сейсмогвоздей, рассматривается процесс распространения безразмерной температуры в режиме с обострением на основе квазилинейного параболического уравнения с источником.

С помощью пространственно-временной замены координат и температуры это уравнение сводится к эллиптическому уравнению, решение которого в земных недрах описывает тепловые спиральные волны на поверхности длинного и тонкого конуса – внешней границе сейсмогвоздя.

В качестве подтверждения адекватности этой тепловой модели рассмотрим две родственные макромоделю из теории деформируемого твердого тела и гидродинамики.

Первая модель обоснована в диссертации О.П. Бушмановой, где развит подход к решению плоской задачи в условиях локализации сдвигов в виде системы спиралей вблизи горизонтальной выработки. Этот подход позволяет описать промежуточное состояние среды: между упругостью (отсутствие линий скольжения) и пластичностью (линии скольжения близки). При вертикальной выработке спиральные линии скольжения вдоль цилиндрической поверхности не будут плоскими.

Гидродинамическая модель функционирования сейсмогвоздей основана на обобщении предыдущей модели и пункте 4 свойств: аморфизация среды водородом происходит с уменьшением объема, т.е. между внешней границей сейсмогвоздя и вмещающей геофизической средой должна возникнуть прослойка в виде квазицилиндрической макротрещины, вдоль которой мантийный водород поднимается в виде циркуляционного потока Громеко-Бельтрами или осесимметричного течения с закруткой по Дж. Бэтчелору.

## Выявление центров аккумуляции углеводородов в фундаменте древних платформ (на примере Оренбургской области)

---

Данилова Е.А. (1, 2)

(1) Институт геофизики им. академика Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

(2) Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

e-mail: danileva@yandex.ru

Результаты современных дистанционных методов изучения планеты позволили уточнить форму известных структур и обратить внимание на не замечаемые ранее тектонические образования. Такими являются дешифрируемые сегодня на космических снимках кольца, круги, овалы, дуги, которые, по мнению исследователей, отражаются в элементах ландшафта и рассматриваются как проявления глубинных зон нарушений фундамента. Кольцевые структуры являются унаследованными, дают информацию о современных неотектонических процессах и, возможно, связаны с процессами очаговой геодинамики, мантийного диапиризма и вулканизма. Многие геологи стали находить связь структур с особенностями распределения месторождений полезных ископаемых по площади. В результате чего кольцевые структуры считаются одним из основных поисковых признаков при обнаружении месторождений алмазов, редкометалльных карбонатитов, графитов, каменных углей и др.

Часть исследователей находит связь радиально-концентрических структур с месторождениями нефти и газа, предполагая, что они представляют собой зоны аккумуляции углеводородов. Центры таких структур являются очагами генерации углеводородов и имеют геодинамическую активность. Зоны радиальных и концентрических разломов – путями миграции углеводородов. В Оренбургской области не раз отмечалось районирующее значение линеаментов при размещении запасов углеводородов. Но связь центров с месторождениями нефти и газа не отмечалась, хотя предпосылки для этого имеются. Ведь судя по расположению залежей углеводородов вокруг Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения, концентрические и дугообразные простирания скопления нефти и газа явно доминируют. Целью настоящей работы была попытка проследить радиально-концентрические структуры фундамента, контролирующие расположение месторождений нефти и газа на территории юго-запада Оренбургской области.

Нами была проведена авторская переинтерпретация временных региональных сейсмических профилей юго-запада Оренбургской области с использованием приема последовательных приближений и детализации, учитывающая все возможные признаки тектонических нарушений для выявления очагов генерации углеводородов. Выполнен анализ результатов геолого-геофизических, геохимических, геоморфологических работ, дешифрирования космических снимков изучаемой территории.

Для региональных профилей отмечены общие закономерности. В районах распространения залежей углеводородов в осадочном чехле на временных разрезах сейсмических профилей выявляются структуры «цветкового» типа. Над скоплениями углеводородов соли кунгурского яруса нижней перми образуют купол. Под месторождениями отмечается хаотическая субвертикально направленная локально усиленная сейсмическая запись, распространяющаяся ниже отражающего горизонта, отождествляемого с кровлей пород фундамента.

По структурным построениям с учетом результатов дешифрирования, геоморфологических работ, конфигурации соляных структур кунгурского яруса, особенностей расположения месторождений углеводородов, получена схематическая сеть разломов фундамента, генетически связанная с новейшими тектоническими сдвигами. Судя по сети, месторождения и выявленные

сейсморазведочными работами структуры имеют закономерное распределение внутри крупной радиально-концентрической структуры диаметром около 250 км. Уникальное Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение расположено в ее «сердце» и, возможно, является результатом деятельности главных очагов генерации углеводородов в фундаменте. Оренбургская радиально-концентрическая структура представляет собой центр аккумуляции углеводородов (по строению напоминающий палеокальдеру) в фундаменте Восточно-Европейской платформы. Вдоль радиальных и концентрических разломов, являющихся, видимо, путями миграции углеводородов, сосредоточены остальные более мелкие залежи нефти и газа.

Аналогичным способом на территории древней Восточно-Европейской платформы выделено еще несколько крупных радиально-концентрических структур. Одна из них тектонически относится к Прикаспийской впадине (диаметр около 700 км), три – к Предуральскому краевому прогибу (диаметр 500 км и более). В центре Средневожской радиально-концентрической структуры (диаметр около 480 км) располагается крупнейшее нефтяное Ромашкинское месторождение, где широко известны факты миграции углеводородов через фундамент в осадочный чехол по разломам и зонам трещиноватости. В пределах выявленных радиально-концентрических структур следует продолжать поисково-разведочные работы на нефть и газ.

# Триггерный эффект генерации геомагнитных возмущений ионизирующим излучением солнечных вспышек.

---

Сорокин В.М., Яценко А.К.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Россия

e-mail: sova@izmiran.ru

В работе рассмотрен механизм генерации возмущения геомагнитного поля с периодом 5 – 10 минут, сопровождающего поглощение в ионосфере ионизирующего излучения солнечных вспышек. Проведенный анализ магнитограмм и их динамических спектров показал, что поглощение ионизирующего излучения солнечных вспышек классов X2.2 и X1.5 сопровождается колебаниями магнитного поля с периодами порядка (5-10) минут. Проведен анализ магнитограмм на различных расстояниях от подсолнечной точки на поверхности Земли, на которых наблюдается колебательный режим возмущения геомагнитного поля. На примере двух вспышек с различной длительностью показано, что чем короче вспышка, тем сильнее выражен колебательный характер возмущения. Для объяснения природы колебаний развита модель их формирования в процессе поглощения ионизирующего излучения в нижней ионосфере. Ионизация ионосферы излучением в проводящей области изменяет ее проводимость и, соответственно, электрический ток. Возникающий импульс электрического тока приводит к выделению тепла и появлению силы Ампера. Проведенные расчеты показали, что плотность энергии, выделяющейся источником тепла и действием силы Ампера одного порядка. Кроме того, плотность выделившейся энергии значительно превышает плотность поглощенной энергии излучения солнечной вспышки. Таким образом, излучение солнечной вспышки является триггером выделения энергии, запасенной ионосферным током. Показано, что появление импульсного источника энергии приводит к генерации акустико-гравитационных волн в нижней ионосфере. Проведен расчет концентрации электронов и проводимости в нижней ионосфере, а также характеристик источника тепла и силы Ампера, возникающих в результате изменения ионосферного электрического тока. Получена модель формирования акустико-гравитационной волны (АГВ) колебаний геомагнитного поля. Проведенные расчеты показали, что распространение импульса АГВ в ионосфере формирует колебания геомагнитного поля с периодами 5 – 10 мин. Наблюдаемое возмущение геомагнитного поля содержит квазистатическую составляющую, которая повторяет зависимость излучения вспышки от времени, и колебательную составляющую, которая связана с генерацией АГВ в нижней ионосфере. Величина их периодов совпадает с периодами собственных колебаний атмосферы в гравитационном поле, характеризующихся частотой Бранта-Вайсяля. Расчеты показали, что амплитуда колебаний убывает с ростом длительности импульса излучения. Эффективность их генерации возрастает в случае, когда длительность действия источника порядка периода собственных колебаний АГВ. Следует отметить, что импульсное изменение тока в ионосфере может генерировать колебания магнитосферного резонатора, однако периоды этих колебаний значительно короче тех, которые рассмотрены в работе. Результаты расчетов, проведенных в рамках рассмотренной модели, согласуются с наблюдениями колебаний магнитного поля во время солнечных вспышек.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 01201356396 и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ и Государственного фонда естественных наук Китая в рамках научного проекта № 21-55-53053.

## Связь характеристик спектров сигналов ультразвукового зондирования с условиями нагружения образца горной породы

---

Патонин А.В. (1), Шихова Н.М. (1), Пономарев А.В. (1), Смирнов .Б. (1, 2), Сахаров П.С. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва, Россия

(2) Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

e-mail: patonin\_borok@mail.ru

По данным проведенных на управляемом прессе INOVA ГО Борок ИФЗ РАН трехосных испытаний образцов горных пород проведен анализ волновых форм сигналов ультразвукового зондирования (УЗ). Образцы высокопористого песчаника нагружались с постоянной скоростью деформации в условиях всестороннего давления. На уровне 85-90 % от предела прочности материала в верхний торец образца инжектировалась вода. Дальнейшие испытания проходили в условиях модулирующего воздействия порового давления.

В ходе испытания регистрировались волновые формы сигналов акустической эмиссии. Через заданные интервалы времени по 16 прямым и наклонным направлениям проводилось ультразвуковое зондирование образца.

Спектральному анализу подвергались волновые формы УЗ сигналов. При вычислении Фурье-спектра сигнала учитывалась амплитудно-частотная характеристика приемно-передающего тракта, включая характеристики самих датчиков. Для оценки величины частотно зависимого затухания спектра упругой волны применялась аппроксимация степенной функцией. В качестве показателя затухания использовалась степень наклона спектра УЗ сигнала с учетом АЧХ приемного тракта.

Отмечено значимое влияние подаваемого флюида на характеристики спектра УЗ сигнала . Показано, что частотно-зависимое затухание УЗ волны связано как с уровнем разрушенности образца, так и с давлением порового флюида. При сравнении динамики скоростей распространения упругих волн в сухом образце с вариациями показателя частотно-зависимого затухания отмечено сходство их изменений при наличии нескольких характерных точек (моменты смены направления роста этих показателей). В стадии насыщенного образца изменения скоростей распространения упругих волн во времени в основном повторяют динамику осевой нагрузки и слабо зависят от величины порового давления. Вместе с этим показатель степени затухания значимо коррелирует с величиной порового давления и может служить его индикатором.

Работа выполнена в Центре коллективного пользования “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” ИФЗ РАН.

# Моделирование пучения и выброса грунта в зоне вечной мерзлоты Ямала

---

Одинцев В.Н. (1), Бобин В.А. (1), Лапиков И.Н. (1), Макаров В.В. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

e-mail: vl.odintsev@yandex.ru

В зоне вечной мерзлоты происходят опасные природные явления – выбросы грунта и газа с образованием на земной поверхности цилиндрических воронок глубиной и диаметром несколько десятков метров. Природа явлений до конца не понятна. Геомеханические исследования должны способствовать их изучению.

В работе рассматривается один из факторов, который может быть причиной выбросов, – разложение газогидратов. В ледогрунтовой толще могут находиться рассеянные и консолидированные твердые газогидраты. При климатическом потеплении среды разложение газогидратов сопровождается образованием газообразного метана с давлением порядка 2МПа. Газ может быть движущей силой геомеханических процессов. В этой связи разработана математическая модель образования полости, заполняемой газом при разложении газогидратов. В модели предполагается наличие горизонтального слоя газогидратов, расположенного на некоторой глубине от земной поверхности. В слое предполагается также наличие небольшой области ослабленных связей – зародышевой трещины. При изменении температуры грунта в трещине появляется свободный метан. Когда давление газа превысит горное давление грунтовой толщи, трещина раскрывается. Далее она развивается параллельно земной поверхности вдоль слоя газогидратов как открытая трещина отрыва Дагдейла-Панасюка, подпитываемая образующимся метаном. Конфигурация трещины изменяется в соответствии с условием минимальных энергетических затрат на образование свободной поверхности, поэтому трещина по мере развития приобретает в плане форму круга.

В проведенных расчетах с помощью МКЭ определены закономерности изменения напряженного состояния ледогрунтовой толщи по мере роста круговой горизонтальной трещины на глубине 30м от земной поверхности. Установлено, когда радиус трещины достигнет примерно 15м на всей ее границе возможно зарождение и развитие в направлении земной поверхности другой, цилиндрической вертикальной трещины такого же радиуса. Она может развиваться либо по механизму сдвига-отрыва с расхождением берегов, либо по механизму чистого сдвига без расхождения берегов. Здесь рассмотрен случай закрытой трещины, развивающейся по механизму чистого сдвига. Показано, при развитии вертикальной закрытой цилиндрической трещины горизонтальная трещина должна прекратить рост. При продолжающемся разложении газогидратов газовая полость с установившемся давлением газа приблизительно 1.5МПа должна увеличиваться за счет смещения вверх части грунта, ограниченного цилиндрической трещиной, которая может прорасти до поверхности. С ростом высоты полости давление газа должно снижаться, но это активизирует процесс разложения газогидратов. Взаимодействие процессов падения давления газа и разложения газогидратов предопределяет достаточно медленный процесс сдвижения сформировавшегося ледогрунтового цилиндра по вертикальной трещине вверх. На земной поверхности это сдвижение должно проявляться как пучение грунта – образование бугра высотой несколько метров.

Расчеты показывают, что перераспределение напряжений в грунтовой толще приводит к появлению областей растяжения с напряжениями до 0.2МПа. Это должно способствовать образованию наведенных трещинно-пор и насыщению изначально непроницаемого грунта свободным метаном, поступающим из газовой полости. При фильтрации метана в трещины-поры создаются



условия для последующего разрушения и выброса газонасыщенного материала по механизму послойного отрыва, описанного исследователями проблемы выбросов угля и газа в угольных шахтах. Квазистатическое равновесие сил, обусловленных весом сдвигающегося ледогрунтового цилиндра, давлением газа в полости, и сил сопротивления сдвигению на берегах трещины может быть нарушено началом разрушения цилиндра как целого по механизму послойного отрыва. Это послойное разрушение наряду со спровоцированным динамическим выталкиванием разрушающегося цилиндра давлением газа снизу можно интерпретировать как выброс грунта и газа с образованием цилиндрической воронки.

Проведенное исследование, основанное на использовании теории трещин, является продуктивным для понимания особенностей геометрии воронок и сдвижения грунта, но не исчерпывающим. Возможны другие постановки геомеханических задач в анализе особенностей выбросов грунта и газа.

# Сезонная зависимость глобального ионосферного электрического поля, создаваемого грозами

---

Денисенко В.В. (1), Райкрофт М.Д. (2)

(1) Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

(2) «Цезарь» консультация, Кембридж, Великобритания

e-mail: denisen@icm.krasn.ru

Электрические токи, протекающие в глобальной электрической цепи (ГЭЦ), замыкаются ионосферными токами. Построена модель распределения ионосферного потенциала, который обеспечивает протекание этих токов. Изучаются только электрические поля и токи, генерируемые грозами, без каких-либо магнитосферных или ионосферных генераторов. Высотные профили атмосферной проводимости задаются эмпирически, учитывается рельеф земной поверхности. Используется двумерная модель ионосферного проводника, основанная на высокой проводимости вдоль геомагнитного поля; пространственные распределения проводимостей Педерсена и Холла рассчитаны с использованием эмпирических моделей. Значения потенциала в E- и F-слоях ионосферы в такой модели не изменяются вдоль силовых линий магнитного поля, и поэтому имеют значение только интегральные проводимости, которые получаются путем интегрирования вдоль этих линий.

Основной прогресс по сравнению с предыдущими версиями модели (Denisenko et al., 2019, Denisenko and Rycroft, 2021) обусловлен использованием модели глобального распределения гроз, полученной по данным Всемирной наземной сети определения местоположения молний (Денисенко и Ляхов, 2021). Глобальные распределения электрического потенциала в ионосфере рассчитаны для разных сезонов года. Созданная модель содержит экваториальные электроструи. Существуют дневные электроструи, сила которых достигает 100 А, и ночные - с вдвое меньшими токами, в то время как общий ток ГЭЦ в нашей модели задан равным примерно 1,5 кА для соответствия кривой Карнеги. Полученные экваториальные электроструи создают магнитные возмущения на земле порядка 0.1 нТл. В принципе, эти магнитные возмущения можно измерить, особенно на ночном геомагнитном экваторе, где они меньше замаскированы другими ионосферными электроструями, которые, в основном, сосредоточены в дневном секторе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00006,

<https://rscf.ru/project/22-27-00006/>

Denisenko V.V., Rycroft M.J., Harrison R.G. Mathematical Simulation of the Ionospheric Electric Field as a Part of the Global Electric Circuit. *Surveys in Geophysics*, 2019. 40(1), 1-35. DOI: 10.1007/s10712-018-9499-6

Denisenko V.V., Rycroft M.J. The Equatorial Electrojets in the Global Electric Circuit. 2021. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 221(3):105704. Doi: 10.1016/j.jastp.2021.105704

Денисенко В.В., Ляхов А.Н. Сравнение наземных и спутниковых данных о пространственно-временном распределении грозных разрядов при низкой солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 111-119. DOI: 10.12737/szf-74202112

# Пространственно-временные структуры в овале полярных сияний: подходы к моделированию

---

Козелов Б.В.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

e-mail: bob-koz@yandex.ru

Взаимодействие окружающей Землю магнитосферно-ионосферной (МИ) системы со средой (солнечным ветром) происходит в форме череды переходных процессов на разных масштабах. Наиболее крупные из них, магнитные бури, очевидно триггируются возмущениями в солнечном ветре. Роль внутренней динамики МИ системы, вызванной в значительной степени нелинейностью и временными запаздываниями процессов поступления и сброса энергии и частиц из солнечного ветра в магнитосферу (load-unload processes), становится более существенной на меньших масштабах (суббури, псевдобурь, инжекции, активизации) [4]. Типичное динамическое состояние МИ системы описывается как самоорганизованная критичность [5] или турбулентность [6,8], для которых свойственны статистическая масштабная инвариантность (скейлинг) в распределениях флуктуаций многих характеристик [9-11]. Динамика МИ системы проектируется в область аврорального овала, само существование которого обусловлено этой динамикой. Пространственно-временная структура авроральных возмущений в большой степени отражает структуру процессов в МИ плазме [12]. Описание этой структуры [1,7] важна как для изучения фундаментального изучения плазменных процессов [3], так и для многих актуальных прикладных вопросов, связанных с прохождением радиоволн в ионосфере и жизнедеятельностью в высоких широтах. В докладе обсуждаются подходы к разработке модели пространственно-временной структуры аврорального овала, основанные на фрактальных и мультифрактальных характеристиках [2,7].

Работа поддержана грантом РНФ № 22-12-20017 «Пространственно-временные структуры в околоземном космическом пространстве Арктики: от полярных сияний через особенности самоорганизации плазмы к прохождению радиоволн».

Литература.

1. Козелов Б.В. Природа полярных сияний и подходы к описанию структуры аврорального свечения // Математические исследования в естественных науках. Труды VII Всероссийской научной школы. Геологический институт Кольского НЦ РАН, Кольское отделение РМО, 3-6 октября 2011 г. – Апатиты: Изд-во K&M, 2011. - с.32-47.

2. Козелов Б.В. и др. Эволюция мультифрактальной структуры транзиентов в распределённых системах // Математические исследования в естественных науках. Труды VII Всероссийской научной школы. Геологический институт Кольского НЦ РАН, Кольское отделение РМО, 3-6 октября 2011 г. – Апатиты: Изд-во K&M, 2011. - с.27-32.

3. Козелов Б.В., Ролдугин А.В. Получение информации об ионосферно-магнитосферной плазме по наблюдениям полярных сияний // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С.366-371.

4. Akasofu S.-I. Polar and magnetospheric substorm // Dordrecht, Holland, 1968.

5. Bak P. How nature works. The science of self-organized criticality // Oxford Uni.Press, 1997.

6. Golovchanskaya I. V., B. V. Kozelov The Range of Alfvénic Turbulence Scales in the Topside Auroral Ionosphere // Cosmic Research, 2016, Vol. 54, No. 1, pp. 47–51.

7. Kozelov B.V. Fractal approach to description of the auroral structure // Ann. Geophys. 2003. V.21. P.2011-2023.

8. Kozelov B.V., Golovchanskaya I.V., Mingalev O.V. Inverse cascade in the structure of substorm aurora and non-linear dynamics of field-aligned current filaments // Ann.Geophys. 2011. V.29.

9. Kozelov B.V., Uritsky V.M., Klimas A.J. Power law probability distributions of multiscale auroral dynamics from ground-based TV observations // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V.31.
10. Lui A.T.Y. Multiscale phenomena in the near-Earth magnetosphere // *J. Atmosph.Solar-Terr. Phys.* 2002. V 64. P.125-143.
11. Milovanov A.V., Zelenyi L.M., Zimbardo G. Fractal structures and power law spectra in the distant Earth's magnetotail // *J.Geophys.Res.* 1996. V.101. №A9. P.19903-19910.
12. Yahnin A.G., Despirak I.V., Lubchich A.A. et al. Relationship between substorm auroras and processes in the near-Earth magnetotail // *Space Sci. Reviews.* 2006. V.122. P.97-106.

# Об экспериментах по выявлению динамического скачка давления флюида в трещине как возможного триггера землетрясений вследствие прохождения сейсмических волн

---

Дьяур Н.И. (1), Jin Y. (2), Zheng Y. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю.

Шмидта Российской Академии Наук, Москва, Россия

(2) Университет Хьюстона, Хьюстон, США

e-mail: dyaur@ifz.ru

Геологическая среда постоянно находится под воздействием различных физических полей. В наблюдательной сейсмологии установлено, что небольшое динамическое возмущение напряжения, при наличии флюида, может быть триггером землетрясения. Механизм, лежащий в основе этого динамического триггера, до конца не изучен.

Возможным механизмом такого динамического триггера землетрясения может быть возрастание давления во флюидах, заполняющих трещины в земной коре в результате прохождения сейсмической волны. Мы называем это Transient Pressure Surge Effect (эффект временного скачка давления). Мы провели низкочастотные эксперименты чтобы обнаружить скачок давления при контролируемых лабораторных условиях и основываясь на численном моделировании, предсказывающего что PS эффект появляется при низкочастотном режиме (Zheng, 2018). В результате мы нашли подтверждение значительного возрастания давления флюида в трещине (Jin и др., 2021).

Для лабораторного эксперимента использовали модель трещины, образованную между двумя соединенными блоками плексигласа толщиной около 8 см каждый и длиной 120 см. Блоки погружались в бассейн с водой. Толщина слоя воды над моделью и под моделью была одинаковой и составляла по 40 см. Пространство между блоками с параллельными стенками плексигласа заполняли водой и дискретно изменяли апертуру трещины от 0.2 мм до 9.2 мм. Боковые и дальняя сторона трещины были закрыты, а близкая к источнику, оставалась открытой. Поскольку PS эффект возможен при низких частотах, нами был создан низкочастотный источник колебаний (X-Frac-S), который устанавливали под водой на фиксированном расстоянии от модели, на уровне глубины трещины, и этот источник генерировал синусоидальные волны давления одной частоты. Частоту колебаний регулировали, и изменяли от 10 до 70 Гц с шагом 1 Гц. Большой трудностью оказался подбор миниатюрных датчиков давления для работы в трещине, поэтому нами были разработаны также датчики давления (X-Frac-H) толщиной  $\approx 0.2$  мм для измерений в трещинах различной апертуры, на базе дискообразной пьезокерамики.

Для качественного измерения эффекта PS мы определяли коэффициент скачка давления (PSF) - отношение между амплитудой волны внутри трещины и амплитудой перед входом в трещину, как функцию частоты входящей волны. Наблюдения показывают, что PSF зависит от геометрии трещины, размеров, апертуры и частоты волны. В наших экспериментах были достигнуты максимальные повышения давления в трещине (PSF) в 25.2 раза при частоте 29 Гц для апертуры 0.95 мм. Экстраполируя PS к масштабам полевых условий (размер трещины более 100 м.) мы предполагаем появление большого PSF ( $>100$ ) на частоте 0.1 Гц или ниже. Эффект скачка давления (PS) может кардинально повышать поровое давления флюида, что способствует преодолению кулоновского барьера, и приводит к образованию разрывов. Данная лабораторная работа по обнаружению и подтверждению феномена скачка давления может быть важным шагом на пути к объяснению механизма динамического триггера землетрясений

Литература.

Zheng, Y. (2018). Transient pressure surge in a fluid-filled fracture. Short note, Bull. Seismol. Soc. Am. 108, no. 3A, 1481–1488

Jin, Y., Dyaaur, N., and Zheng, Y. (2021). Laboratory Evidence of Transient Pressure Surge in a Fluid-Filled Fracture as a Potential Driver of Remote Dynamic Earthquake Triggering. *The Seismic Record*. 1, 66–74

# Напряженное состояние Курило-Камчатской зоны субдукции после Симуширских землетрясений 2006–2007 гг.

---

Полец А.Ю.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской , Южно-Сахалинск, Россия

e-mail: polec84@mail.ru

Центрально-курильский сегмент Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны долгое время характеризовался пониженной сейсмической активностью. На протяжении многих десятилетий вопрос о возможности землетрясений с моментной магнитудой  $M_w \geq 7.7$  на Средних Курильских островах оставался дискуссионным [3].

15 ноября 2006 г. в центральной части Курильской зоны произошло первое сильное землетрясение,  $M_w=8.3$ , за счет типичных для островодужных землетрясений субгоризонтальных напряжений сжатия, механизм очага – пологий надвиг. Событие такой силы было зафиксировано в данном районе впервые за всю историю сейсмологических наблюдений. Вслед за ноябрьским событием, последовало второе землетрясение 13 января 2007 г.,  $M_w=8.1$ , под действием субгоризонтальных напряжений растяжения, механизм очага – сброс.

Землетрясения 2006–2007 гг. заняли особое место в сейсмической истории Курильской зоны, они существенно поменяли сложившиеся представления о сейсмическом потенциале центральной ее части и продолжительности сейсмического цикла и могли привести к заметному изменению напряжений как в окрестности очага, так и за его пределами.

Для реконструкции поля современных тектонических напряжений Курило-Охотского региона после сильнейших Симуширских землетрясений 2006–2007 гг. применялся метод катакластического анализа разрывных нарушений. Метод позволяет осуществлять согласованный расчет ориентации главных осей тензоров напряжений и приращений сеймотектонических деформаций и коэффициентов, определяющих вид этих тензоров [2]. При расчетах использовались механизмы очагов землетрясений в магнитудном диапазоне от 4.7 до 6.5. Обработка исходных сейсмологических данных производилась для разных глубинных и временных интервалов.

По результатам реконструкции тектонических напряжений действовавших перед Симуширскими землетрясениями 2006 г., 2007 г., в работе [1], выявлена, область латерального растяжения на глубинах 0–30, 30–60 и 60–120 км. Было также показано, что данная область растяжения сформировалась не в процессе первого Симуширского землетрясения 15.11.2006 г., а задолго до него.

Реконструкция, выполненная после Симуширских землетрясений, показала, наличие области растяжения на глубинах 0–30 км только в афтершоковый период и ее отсутствие после 2009 г. На глубинах 30–60 км, для всех рассматриваемых временных интервалов область горизонтального растяжения не выявлена, преимущественный геодинамический режим горизонтальное сжатие. На глубинах 60–120 км область горизонтального растяжения по-прежнему сохраняется.

На втором этапе реконструкции определялись относительные значения шаровой и девиаторной компонент тензора напряжений. Домены с повышенными значениями относительного всестороннего давления приурочены к границам афтершоковых областей Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. Такое их распределение согласуется с представлением о повышенных значениях напряжений вблизи границ поверхности разрушения, которые в данном случае отождествляются с границами афтершоковых областей [Ребецкий, 2007].

Выполненная реконструкция показала, что поле напряжений наиболее неоднородно во время афтершоковых процессов. В период интенсивной активизации после сильных землетрясений

происходит резкая перестройка в строении геологической среды, что в свою очередь проявляется в изменчивости поля напряжений по пространству.

Литература

1. Полец А.Ю., Злобин Т.К. Реконструкция тектонических напряжений до и после катастрофических Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. // Доклады РАН. 2012, Т. 445, № 1. С. 90–93.

2. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. Научное издание М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 406 с.

3. Тараканов Р.З. Сейсмичность, глубинное строение и сейсмическая опасность Курило-Охотского региона: дис. в виде науч. докл. д-ра физ.-мат. наук. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2006. 76 с.



# Глубокофокусные землетрясения Курило-Охотского региона

---

Полец А.Ю.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики  
Дальневосточного отделения Российской, Южно-Сахалинск, Россия

e-mail: polec84@mail.ru

На Земле распределение сейсмических толчков по глубине неравномерно. На одних глубинах сосредоточены очаги землетрясений, на других они отсутствуют или встречаются редко. Очаги практически всех глубокофокусных землетрясений расположены в Тихоокеанском поясе. Сравнительный анализ распределения глубокофокусных землетрясений в Северном и Южном полушариях показывает, что в Южном полушарии их больше чем в Северном, т.е. процессы в мантии происходят, по-видимому, различно в Северном и Южном полушариях Земли, а неоднородность сейсмичности свидетельствует о различной скорости протекания этих процессов. На сегодняшний день в Северном полушарии больше всего сильных глубокофокусных землетрясений зарегистрировано в Курило-Охотском регионе. Эпицентры глубокофокусных землетрясений Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны протягиваются широкой полосой от западного побережья Камчатки до пересечения в Приморье с Идзу-Бонинской зоной глубокофокусных землетрясений [3].

В работе рассмотрен вопрос о возможной взаимосвязи сейсмичности в глубоких и верхних областях сейсмогенной зоны. Впервые на взаимосвязь глубокофокусных и мелкофокусных землетрясений обратил внимание японский сейсмолог К. Моги [2, 5], подобная взаимосвязь отмечена также в работах [1, 4]. По данным Моги, важными свидетельствами связи между глубокофокусными и мелкофокусными сильными землетрясениями являются возрастание глубинной сейсмической активности перед коровыми землетрясениями и возникновение сильного толчка после глубинной активизации, т.е. возрастание сейсмичности можно рассматривать как один из предвестников сильных мелкофокусных землетрясений.

В качестве примера можно выделить сильнейшие глубокофокусные землетрясения в Охотском море 5.07.2008 г. ( $M_w = 7,7$ ), 14.08.2012 г. ( $M_w = 7,7$ ), 24.05.2013 г. ( $M_w = 8,3$ ) и реакцию на них в виде удаленных форшоков и афтершоков в участках Курило-Камчатской сейсмогенной зоны за многие сотни километров.

## Литература

1. Захарова А.И., Рогожин Е.А. Соотношение магнитуд сильных землетрясений с параметрами процессов их глубокофокусных форшоков // Геофиз. исслед. 2005. 2. С. 7–32.
2. Моги К. Предсказание землетрясений. М.: Мир. 1988. 382 с.
3. Тараканов Р.З. Строение фокальной зоны Курило-Камчатской островной дуги // Земная кора островных дуг и дальневосточных морей. М.: Наука, 1971. С. 215–234.
4. Юнга С.Л., Рогожин Е.А., Родина С.Н. Алгоритм и методика анализа механизмов глубокофокусных очагов для выявления зон подготовки сильных землетрясений Курило-Охотского региона // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47, 3. С. 31–43.
5. Mogi K. Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms – the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena // Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ. 1963. N 41. P. 615–658.

# Структурно-тектоническая неоднородность Приморского разлома (Байкальская рифтовая зона) на основе данных дистанционного зондирования

---

Свечеревский А.Д. (1), Устинов С.А. (1), Петров В.А. (1), Остапчук А.А. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), Москва, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН), Москва, Россия

e-mail: svecherevskiy@gmail.com

В области разломной тектоники особенно актуальными становятся проблемы, связанные со спецификой формирования разрывных структур. Сложная внутренняя организация разломных зон наряду с описанием качественных литологических, петрографических, структурных особенностей требует проведения серии количественных оценок.

Объектом исследования являлся Приморский разлом Байкальской рифтовой зоны. Он относится к Обручевской системе сбросов и является крупнейшей неотектонической структурой. Благодаря геоморфологической выраженности, хорошей обнаженности и доступности для изучения Приморский глубинный разлом является опорным при палеотектонических реконструкциях.

Для выявления структурно-тектонической неоднородности Приморского разлома на первом этапе на основе данных SRTM создана детальная цифровая модель рельефа (ЦМР). Для оптимального выделения линеаментов с помощью программного обеспечения ENVI на основе ЦМР создавались схемы теневого рельефа. Для этого применялась нелинейная направленная фильтрация изображения. На следующем этапе с помощью модуля «LINE» программного обеспечения PCI Geomatica осуществлялось автоматическое извлечение линеаментов. Визуализация и пространственный анализ выделенных линеаментов проводился в свободно распространяемой кроссплатформенной геоинформационной системе QGIS. Для оценки ширины зоны динамического влияния Приморского разлома в QGIS с помощью специализированного модуля строилась схема плотности линеаментов. Анализ схемы плотности линеаментов позволил выделить предполагаемую зону динамического влияния разлома. Выделены отдельные сегменты зоны динамического влияния, характеризующиеся различным пространственным распределением оперяющих линеаментов и, наиболее вероятно, параметрами поля напряжений-деформаций.

На заключительном этапе выявления структурно-тектонической неоднородности и реконструкции сдвиговых полей напряжений Приморского разлома применялся структурно-геоморфологический (СГ) метод Л.А. Сим. Ориентация оперяющих разрывов, направление горизонтальных осей сжатия и растяжения, обусловивших сдвиговое перемещение, по отношению к плоскости разлома изменяются в зависимости от геодинамической обстановки. В результате реконструируется ориентировка осей сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости, определяется направление сдвигового перемещения по разлому (правый или левый) и воссоздается геодинамическая обстановка формирования разлома (сжатия или растяжения).

На основе результатов комплексного линеаментного анализа детальной ЦМР, в сочетании с результатами СГ-метода Л.А. Сим, удалось оконтурить зону динамического влияния Приморского разлома. В рамках данной зоны выявлены сегменты, характеризующиеся различными показателями плотности линеаментов, и, вероятно, параметрами поля напряжений-деформаций. Для каждого сегмента проведена интерпретация роз-диаграмм ориентировки оперяющих разлом линеаментов (мегатрещин), установлена кинематика сегментов разлома и ориентировка главных осей поля напряжений. Выявлена общая тектоническая неоднородность рассматриваемой структуры.

Использованный подход универсальный и может быть применён для анализа разномасштабных разрывных структур.

## Лабораторное исследование нелинейности закона фильтрации в низкопроницаемой известняковой породе

---

**Барышников Н.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН), Москва, Российская Федерация

e-mail: nabarysh@gmail.com

Многие исследователи отмечают уменьшение эффективной проницаемости образцов горных пород в области малых скоростей потока. В терминах закона фильтрации это выражается в отклонении от линейного вида зависимости скорости фильтрации жидкости от градиента порового давления вплоть до возникновения так называемых пороговых градиентов, ниже которых скорость фильтрации равна нулю. Предполагается, что это явление может быть связано с влиянием адсорбционных слоев с измененными свойствами на границах раздела жидкой и твердой фаз. Традиционные методы изучения течений флюидов в пористых породах плохо подходят для изучения их проницаемости при приближении к нулевым дебитам из-за недостаточной точности. Такие исследования также требуют особого подхода к интерпретации полученных данных. В то же время в известных публикациях отсутствует обсуждение соответствующей методики эксперимента. Нашей целью было разработать методику, подходящую для изучения проницаемости образцов горных пород при крайне низких скоростях потока. Используя разработанную экспериментальную методику, мы провели три серии последовательных испытаний на трех одинаковых образцах известняка. Образцы были взяты из водоносного горизонта, однако их пористость и проницаемость аналогичны типичным параметрам плотного нефтяного коллектора. Использовалась методика стационарного течения, когда градиент порового давления медленно уменьшался до нуля. В каждом испытании была получена зависимость эффективной проницаемости от градиента давления при скорости потока порядка  $10^{-6}$  м/с. Помимо отклонения от линейного закона Дарси в ходе серии испытаний у части образцов наблюдалось снижение их эффективной проницаемости. Было установлено, что в образце с наиболее выраженным отклонением от линейного течения произошло самое значительное снижение чистой проницаемости во всей серии. Мы полагаем, что у снижения проницаемости и отклонения закона фильтрации от линейного была общая причина, которая могла быть связана с закупоркой пор газом.

# Влияние зимних внезапных стратосферных потеплений на изменчивость параметров верхней нейтральной атмосферы и ионосферы

---

Медведева И.В., Ратовский К.Г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени  
Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия  
e-mail: ivmed@iszf.irk.ru

Динамические возмущения в нижних слоях атмосферы могут иметь существенное влияние на верхнюю нейтральную атмосферу и ионосферу. Одним из наиболее ярких процессов, во время которых проявляется динамическое взаимодействие различных слоев атмосферы, являются зимние внезапные стратосферные потепления (ВСП), когда происходит значительное и внезапное повышение температуры «взрывного характера» в зимней полярной стратосфере. Эффекты, связанные с ВСП, могут наблюдаться в большом диапазоне широт, от полюса до тропиков, и возмущениями охватывается большой высотный диапазон, от тропосферы до термосферы. В работе представлены результаты исследования изменчивости температуры атмосферы в области мезопаузы и максимума электронной концентрации NmF2 в периоды действия ВСП, относящихся к различным типам. Анализ проведен по экспериментальным данным, полученным на комплексе инструментов ИСЗФ СО РАН. Использованы данные о температуре мезопаузы, полученные по спектрометрическим наблюдениям эмиссии молекулы гидроксила (полоса OH(6-2) 834.0 нм, высота максимума излучения  $\sim 87$  км) в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (51.8°N, 103.1°E, Торы), и данные вертикального зондирования о максимуме электронной концентрации (NmF2), полученные на иркутском ионозонде DPS-4 (52.3° N, 104.3° E). К анализу были также привлечены спутниковые данные измерения профилей температуры атмосферы радиометра MLS Aura и данные реанализа MERRA-2. В качестве характеристики атмосферной изменчивости использованы стандартные отклонения температуры мезопаузы в годовом и ночном ходе, что дает возможность анализировать проявление активности волновых процессов различного временного масштаба в верхней атмосфере. В качестве характеристики ионосферной изменчивости использована изменчивость максимума электронной концентрации F2-области (NmF2). Исследованы и сопоставлены вариации в различных временных периодах: межсуточные вариации ( $T > 24$  ч.), приливные вариации ( $8 \text{ ч.} \leq T \leq 24 \text{ ч.}$ ), а также вариации с периодами внутренних гравитационных волн ( $T < 8$  ч.). Выявлено, что во время действия всех анализируемых ВСП наблюдалось усиление атмосферной и ионосферной изменчивости. Обнаружены также существенные различия проявления волновой активности на высотах мезопаузы и ионосферной F2-области в периоды ВСП различного типа. Так, незначительное (minor) ВСП в феврале 2016 г. привело к интенсификации внутрисуточной атмосферной и ионосферной изменчивости с периодами приливов и внутренних гравитационных волн, ионосферная возмущенность в приливном диапазоне в  $\sim 2$  раза превышала средние сезонные значения. Во время значительных (major) ВСП в январе 2013 и феврале 2018 гг. наблюдалось усиление межсуточной атмосферной и ионосферной изменчивости (до  $\sim 400\%$  и до  $\sim 300\%$  по сравнению со средними сезонными значениями, соответственно), которая может быть вызвана интенсификацией активности планетарных волн в верхней атмосфере.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00212. В работе были использованы экспериментальные данные оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>, алгоритмы и методы анализа, разработанные при финансовой поддержке Минобрнауки России.

# Новые свойства афтершоков сильных землетрясений и их связь с размером очаговой зоны

Завьялов А.Д. (1), Зотов О.Д. (1, 2), Гульельми А.В. (1)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Геофизическая обсерватория “Борок” ИФЗ РАН, Москва, Россия

e-mail: zavyalov@ifz.ru

В работе использованы данные мирового каталога землетрясений USGS/NEIC с 1973 по 2019 гг. Исследована зависимость числа повторных толчков на коротких интервалах времени – не более 24 ч после главного толчка, и расстояниях от эпицентра (или гипоцентра для глубокофокусных землетрясений) главного толчка до  $5^\circ$ . Основным методически приемом во всех построениях являлся метод наложения эпох. При этом и моменты возникновения главных толчков, и координаты их эпицентров/гипоцентров играли роль репера для синхронизации последовательностей повторных толчков.

В результате анализа обобщенных (накопленных) пространственных распределений афтершоковых последовательностей, полученных при изучении большого числа главных толчков в различных диапазонах магнитуд и глубин (совокупный объем выборок составляет тысячи главных толчков и десятки тысяч афтершоков) установлены два новых свойства пространственного распределения повторных толчков. Первое свойство – максимум кривой, описывающей пространственное распределение афтершоков, наблюдается на определенном расстоянии (примерно от 10 до 120 км) от эпицентра главного толчка. При этом логарифм этого расстояния прямо пропорционален магнитуде главного толчка. Второе свойство – положение максимума не зависит от времени, т.е. является стабильной пространственной характеристикой очага, по крайней мере, на рассматриваемых нами коротких интервалах времени после главного толчка.

Эти свойства оказались характерны не только для неглубоких главных толчков, но и для глубоких с глубинами гипоцентров более 300 км. Они положены нами в основу определения размера очаговой зоны. Оказалось, что зависимость расстояния максимума пространственного распределения афтершоков от магнитуды главных толчков достаточно хорошо аппроксимируется уравнением  $\lg R[\text{км}] = 0.43 * M - 1.57$  (1). Если расстояние от главного толчка до максимума пространственного распределения афтершоков интерпретировать как средний радиус  $R$  очаговой зоны, то тогда в среднем  $L = 2 * R$ , и из (1) получаем эмпирическую формулу для характерного размера очаговой зоны  $\lg L[\text{км}] = 0.43 * M - 1.27$  (2) [1]. Заметим, наша формула (2) практически совпадает с формулой Ю.В. Ризниченко [2]  $\lg L[\text{км}] = 0.44 * M - 1.29$  (3), но несколько отличается от формулы, предложенной Уэлсом и Копперсмитом в [3]  $\lg L[\text{км}] = 0.67 * M - 2.94$  (4).

Аналогичный подход мы использовали при определении характерного размера очаговой зоны глубокофокусных землетрясений. Для них регрессионное соотношение имеет вид  $\lg L[\text{км}] = 0.23 * M + 0.04$  (5). Оно отличается от соотношения (2). Однако заметим, что в случае глубокофокусных землетрясений статистика главных толчков и их афтершоков уменьшилась более чем на порядок. Также сократился магнитудный диапазон исследованных главных толчков. Возможно в этом причина различия регрессионных соотношений  $L \sim f(M)$  для неглубоких (2) и глубоких (5) землетрясений.

В заключение заметим, что в работе мы сосредоточили внимание на поиске наиболее общих, устойчивых свойств очаговой зоны, используя указанные выше статистические особенности пространственного распределения совокупности афтершоков для совокупности главных толчков. Нам не интересовали индивидуальные особенности пространственных характеристик афтершоковых последовательностей главных толчков. В результате нам удалось показать возможность использования установленных свойств афтершоков для определения характерного размера очаговой зоны

как неглубоких, так глубокофокусных главных толчков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программ государственных заданий Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Завьялов А.Д., Зотов О.Д. Новый способ определения характерного размера очаговой зоны // Вулканология и сейсмология. 2021, №1, с. 22-29. DOI: 10.31857/S0203030621010065

2. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 9–27.

3. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seis. Soc. Am. 1994, Vol.84, №4, pp. 974-1002.

## Перспективы безопасной отработки Ловозерского редкометалльного месторождения на глубоких горизонтах

---

**Ловчиков А.В., Королёв А.А.**

ФФедеральный исследовательский центр "Кольский научный центр РАН"(ФИЦ КНЦ РАН), Апатиты, Россия

e-mail: yakov-2001@mail.ru

А.В. Ловчиков, А.А. Королёв

Перспективы отработки Ловозерского редкометалльного месторождения на глубоких горизонтах.

Ловозерское редкометалльное месторождение эксплуатируется рудником «Карнасурт» с 1951 года. Рудник обрабатывает 2 маломощные (мощностью по 1 м каждая) пологопадающие пластообразные рудные залежи, разделённые пропластком, толщиной 100 м, с выходящей залежей на дневную поверхность. В настоящее время отработка нижней залежи остановилась на отметке +280 м (максимальная глубина от поверхности – 600 м). Запланирована отработка залежей до 2035 года, до отметки от поверхности 0м, когда глубина горных работ достигнет 900 м от поверхности. Ловозерское месторождение в целом и рудник «Корносурт» в частности отнесены Госгортехнадзором РФ к угрожаемым и склонным по горным ударам, то есть все планируемые к отработке глубокие горизонты рудника является удароопасными.

Отработка рудных залежей на руднике ведётся сплошной системой разработки с поддержанием покрывающих толщ пород ленточными около штрековыми, междубовыми и изолированными податливыми внутриблоковыми целиками. Целики являются наиболее удароопасными элементами системы разработки. Выполнен расчёт размеров целиков для глубоких горизонтов рудника. Для защиты от опасности горных ударов предусмотрено образование в целиках разгрузочных щелей. Выполнен расчёт размеров целиков с учетом и без учета разгрузочных щелей. Для обеспечения безопасности от горных ударов внутриблоковых целиков предусмотрено камуфлетное взрывание шпуров в них, что обеспечивает податливость целиков и безопасность по горным ударам.

За счёт указанных профилактических мероприятий обеспечивается безопасность горных работ на глубоких горизонтах по фактору горных ударов.



## Влияние структуры на особенности разрушения горных пород: лабораторный эксперимент и моделирование методом дискретных элементов

---

Дамаскинская Е.Е. (1), Гиляров В.Л. (1), Гесин И.Д. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

(2) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия

e-mail: Kat.Dama@mail.ioffe.ru

Предложена компьютерная модель разрушения гетерогенных материалов (в том числе, горных пород), позволяющая исследовать эволюцию дефектной структуры (трещин) в процессе деформирования. Модель основана на методе дискретных элементов (DEM - Discrete element method), который наиболее адекватен для моделирования разрушения гетерогенных материалов. В отличие от методов, основанных на механике сплошных сред, модели дискретных элементов естественным образом имитируют образование и развитие трещин.

В работе была использована модель связанных частиц (bonded particle model – BPM [1]), различные модификации которой широко применяются для изучения поведения материалов при механическом разрушении. Материал представляется как совокупность сферических частиц (моделирующих зерна поликристалла), соединенных связями (моделирующими межзеренные границы) в местах контактов частиц. В модели BPM зарождение трещин определяется разрывом связей между частицами, а распространение - слиянием множества разорванных связей [2].

Были проведены компьютерные эксперименты при различных параметрах материала (дисперсия зерен по механическим свойствам и размеру, различные свойства на границах зерен), с целью выявления их влияния на картину локальных напряжений, процесс образования дефектов и формирование очага разрушения. Расчеты производились в свободно распространяемом пакете программ MUSEN [3].

Моделировались образцы цилиндрической формы диаметром 10mm и высотой 20mm. Размеры подобраны таким образом, чтобы была возможность сравнить результаты компьютерных экспериментов, с результатами лабораторных экспериментов, полученных ранее на образцах горных пород таких же размеров. Цилиндры заполнялись сферическими частицами одного или разных размеров и упаковывались до достижения пористости 0.35–0.37. В качестве материалов, из которых состояли сферические зерна и связи между ними (межзеренные границы), использовались материалы с механическими параметрами, соответствующими различным минералам и горным породам: гранит, кварц, ортоклаз, олигоклаз, стекло. Образец помещался в виртуальный пресс, в котором нижняя плита была неподвижна, а верхняя перемещалась в направлении нижней с постоянной скоростью до тех пор, пока образец не разрушался.

Расчет максимальных локальных напряжений показал, что гомогенность материала приводит к большей неоднородности локальных напряжений в пространстве, и наоборот, гетерогенность способствует большей их однородности. Подобное поведение локальных внутренних напряжений, рассчитанных на основании кинетической концепции С.Н. Журкова [4], наблюдалось в лабораторных экспериментах по деформированию образцов гранита Westerly и песчаника Berea. [5].

Предложенная модель поликристаллических материалов реалистично описывает некоторые особенности их разрушения в тех случаях, когда основные процессы протекают по границам зерен. К таким особенностям относятся хрупкий характер разрушения гомогенных материалов и наличие нелинейной упругости (пластичности) для более гетерогенных, выявленные при помощи

диаграммы напряжение–деформация, и поведение во времени «акустической активности» – числа разорванных связей за единицу времени. Для гетерогенных материалов модель демонстрирует двухстадийный характер разрушения, когда на первой стадии происходит накопление дефектов однородно по образцу, а на второй стадии - формирование и рост очага разрушения.

Мы предполагаем, что дальнейшие компьютерные эксперименты и их анализ позволят сопоставить распределение эволюционирующих в процессе разрушения дефектов по размерам и энергетическое распределение сигналов акустической эмиссии. Это позволит выяснить, при каких условиях происходит переход от Марковского процесса к состоянию самоорганизованной критичности.

Список литературы.

1. D.O. Potyondy, P.A. Cundall. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, 1329–1364, (2004)
2. A. Lisjak, G. Grasselli. *J. of Rock Mech. and Geotechnical Engineering* 6, 301, (2014)
3. M. Dosta, V. Skorych. *SoftwareX* 12, 100618, (2020)
4. S.N. Zhurkov. *J. Fracture Mechanics* 1, 311 (1965)
5. В.Л. Гиляров, Е.Е. Дамаскинская. *ФТТ*, 63, 6, 783-787 (2021)

## Комплекс новых подходов к уточнению сейсмической опасности (опыт Кыргызстана)

---

**Орунбаев С.Ж.**

Американский университет Центральной Азии, Бишкек, Кыргызстан

e-mail: s.orunbaev@gmail.com

Предмет исследования – совершенствование методов оценки сейсмической опасности связанные с величиной максимально возможного сейсмического воздействия и локальными условиями. В горных условиях, где толщина грунтового слоя всего несколько десятки метров от скального массива, необходимо более детально изучать локальные условия. Само по себе изучение локальных условий проводились инженерно-геологическими методами, до последнего времени его анализ проводился главным образом в рамках инженерной сейсмологии. Задача данной работы – изучить величины максимально возможного сейсмического воздействия, и уточнении локального отклика на такое воздействие.

Ошибка в определении максимально возможного сейсмического воздействия ввиду редкой повторяемости сильных землетрясений может достигать 2-3 баллов, а типичная ошибка из-за недоучета локальных грунтовых условий обычно составляет от пол балла (в исключительных случаях до 1.5 балла).

С инженерно-строительной точки зрения, верхний грунтовой 30-метровый слой считается важным фактором для планировки конструкции зданий и инфраструктур. Изучение распространение сейсмических волн на грунте и в здании, позволяет описать взаимосвязь грунт-здание (soil-structure interaction) и динамические воздействие здания (смотреть прямые и обратные задачи), создать теоретическую основу для решения важных задач инженерной сейсмологии.

В сейсмологической практике не ясен ряд вопросов принципиального характера, в частности:

1) как устроены периоды колебания рыхлого грунта вблизи инфраструктуры;

можно ли, и как определить параметры (частотные характеристики, скорость сдвиговых волн на 30-метровой толще, размеры/толщина грунтового слоя) с помощью сейсмического шума, независимо от геологических данных, данных о поверхностных волнах и иной трудно получаемой информации;

2) имеет ли место практически достоверная связь скоростей сдвиговой волны ( $V_{s30}$ ) для тектонически активных горных районов по свойствам геоморфологии (террасам) местности;

3) какова геомеханическая природа процесса перехода сейсмических волн от грунтового слоя к инфраструктуре;

4) как корректно экстраполировать наблюдения колебаний грунта, полученные при средних расстояниях и магнитудах, на большие магнитуды и малые расстояния, как теоретически обосновать эмпирические закономерности инженерной сейсмологии.

Предложен и реализован комплекс новых подходов, обеспечивающих уточнение оценок сейсмической опасности в плане оценки величин максимальных сейсмических воздействий и учета грунтовых условий.

Получена площадная оценка величин максимальных сейсмических воздействий, величин PGV на основе полевых макросейсмических данных в Памиро-Алайской зоне коллизии и для района верхнего течения Нарына.

Определена сравнительная эффективность и опробован эффективный метод определения величин сайт-эффекта на основе анализа поля микросейсм. Разработан и опробован способ классификации грунта, используя частотные характеристики грунта.

## Генерация геомагнитного поля в ионосфере волной цунами в средних широтах

---

**Ященко А.К., Сорокин В.М.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: alex@izmiran.ru

В работе рассмотрен механизм генерации возмущения геомагнитного поля, сопровождающего распространение волны цунами. Источником возмущения являются электрические токи в морской среде и в ионосфере. Ток в морской среде возникает в результате ее движения в волне цунами в геомагнитном поле, а ток в ионосфере возникает в результате падения на нее акустико-гравитационной волны (АГВ), распространяющейся из атмосферы. Её источником является вертикальное смещение поверхности морской среды во время распространения в ней волны цунами. Несмотря на то, что проводимость ионосферы значительно меньше проводимости морской среды, величина тока в ней может превышать величину тока в морской среде в результате экспоненциального роста амплитуды акустико-гравитационной волны в процессе ее распространения вверх. Получено пространственное распределение геомагнитных возмущений, генерируемых электрическими токами, протекающими в морской среде и в ионосфере, с учетом их взаимной индукции. Наличие электрического тока в ионосфере значительно меняет характеристики возмущения геомагнитного поля, генерируемого волной цунами. С ростом горизонтального масштаба волны цунами и глубины морской среды ток в ионосфере, генерируемый АГВ, может увеличить амплитуду наблюдаемого на земле возмущения в несколько раз. Оценки показывают, что для параметров дневной ионосферы амплитуда геомагнитных возмущений, связанных с волной цунами, может достигать значений (1–10) нТл. В ночных условиях интегральная проводимость ионосферной плазмы уменьшается на порядок, что приводит к существенному уменьшению влияния ионосферных токов. В модели электрический ток в ионосфере, генерируемый АГВ, замыкается на сопряженную ионосферу с помощью продольных токов, что приводит к возбуждению поперечных компонентов магнитного и электрического полей на высотах верхней ионосферы и магнитосферы. Амплитуда магнитного и электрического полей, а также продольного тока в ионосфере могут достигать значений порядка 10 нТл, 10 мВ/м, и  $10^{-8}$  А/м<sup>2</sup>, соответственно. Это позволяет сделать вывод о возможности мониторинга волны цунами космическими методами.

## Сейсмичность шельфа Баренцева и Карского морей (Западная Арктика) за инструментальный период

---

Морозов А.Н. (1, 2), Ваганова Н.В. (2)

(1) Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

(2) Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаврова Уральского отделения РАН, Архангельск, Россия

e-mail: morozovalexey@yandex.ru

В течение всего инструментального периода обширные территории Арктики были крайне неравномерно и слабо охвачены стационарными сейсмическими наблюдениями. Как следствие, во-первых, из-за высокого значения представительной магнитуды, из анализа выпадал достаточно большой пласт низкомагнитудных землетрясений. Во-вторых, вычисление основных параметров зарегистрированных землетрясений в Арктике в течение всего инструментального периода проходило в условиях малого количества станций и их удалённости от очага, с применением устаревших в настоящее время скоростных моделей и алгоритмов локации. Бюллетени не всех функционировавших в разные периоды времени сейсмических станций были доступным исследователям.

В итоге распределение эпицентров части землетрясений, особенно на шельфовых территориях, не всегда соответствует действительности. А это, в свою очередь, может иметь последствия для последующих исследований связанных с оценкой сейсмической опасности территории. Ведь изучение Арктики представляет не только фундаментальный научный интерес, но и прикладной. С практической точки зрения исследования должны быть нацелены на обеспечение безопасности природопользования. Мировой опыт показывает, что недостаточный учет геодинамических факторов при разработке и эксплуатации месторождений приводит к неоправданно большим экономическим потерям.

Поэтому, в настоящее время актуальными являются исследования по уточнению параметров арктических землетрясений, зарегистрированных в течение всего периода инструментальных наблюдений, и выявлению на основе данных новых сейсмических станций сейсмоактивных зон в тех районах Арктики, для которых ещё недавно это было технически невозможно сделать.

В статье представлены результаты исследований по созданию сводного уточнённого каталога землетрясений, произошедших в Баренцево-Карском регионе, за весь инструментальный период. Каталог может служить основой для последующих исследований, связанных с оценкой сейсмической опасности территории, построением геодинамических моделей, исследованием напряженно-деформированного состояния земной коры в Баренцево-Карском регионе.

## Ионосферная антенна бегущей волны, формируемая КВ интерферометром с произвольным углом наклона главного луча

---

Котик Д.С., Яшнов В.А.

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

e-mail: dmitry.kotik@nirfi.unn.ru

Ранее было показано, что при использовании двух мощных передатчиков работающих на две антенные решётки с вертикальной диаграммой направленности фазовые центры которых отстоят на расстояние  $d$  с разносом несущих частот  $F = f_1 - f_2$  в нижней ионосфере возникает движущийся источник низкочастотного излучения (см. Котик Д.С., и др, О возможности образования сверхсветового Черенковского источника с помощью эффекта Гетманцева, Труды II Суздальского симпозиума УРСИ «Модификация ионосферы мощными радиоволнами». Москва, ИРМИРАН пресс, 1986). Фазовая скорость этой бегущей волны совпадает с фазовой скоростью главной моды волновода Земля – ионосфера на частоте  $F = fd/h$  ( $F$  – разность несущих частот,  $h$  – высота ионосферного источника над поверхностью Земли). На этой частоте наблюдается максимум в амплитуде излучения в эксперименте. В работе рассмотрен более общий случай при работе КВ интерферометра с произвольным углом наклона главного луча обоих излучателей. В этом случае излучатели также разнесены на расстояние  $d$ , также как и в первом случае  $F = f_1 - f_2$  – разность частот излучателей. Показано, что частота  $F$  сильно зависит от направления главного луча и может изменяться в широких пределах от единиц до полутора десятка килогерц. При этом возможно согласование волны источника с фазовой скоростью нескольких первых мод волновода. Отметим, что пока экспериментальная проверка в такой постановке не проводилась, хотя технические возможности современных нагревных стендов позволяют поставить подобного рода эксперимент.

## Система сейсмического мониторинга промышленной площадки Восточного рудника КФ АО "Апатит"

---

**Федоров А.В. (1), Асминг В.Э. (1), Федоров И.С. (1), Корчак П.А. (2),  
Стрешнев А.А. (2), Моторин А.Ю. (2), Воронин А.И. (1)**

(1) Кольский филиал Федерального Исследовательского Центра "Единая геофизическая служба Российской академии наук Апатиты, Россия

(2) Кировский филиал АО "Апатит Кировск, Россия

e-mail: Afedorov@krsc.ru

В 2020 году сотрудниками Кольского филиала ФИЦ ЕГС РАН в рамках соглашения с Кировским филиалом АО "Апатит" была начата работа по созданию автоматизированной системы сейсмического мониторинга промышленной площадки Восточного рудника КФ АО "Апатит" (АССМ ВР).

При сейсмическом мониторинге площадок производства открытых и подземных горных работ важно обеспечить максимальную точность определения гипоцентров сейсмических событий и минимальный энергетических порог регистрации. Эти два параметра крайне важны с точки зрения выявления возможных активизируемых структур для дальнейшего принятия мер по снижению рисков ведения горных работ.

Точность определения координат сейсмических событий, во многом контролируется геометрией расположения элементов сети сейсмических станций. На этапе проектирования АССМ ВР в КоФ ФИЦ ЕГС РАН была выполнена работа по определению максимальных возможных ошибок локации с применением методов математического моделирования. Начальные положения размещения сейсмостанций выбирались из соображений обеспечения равномерного азимутального охвата контролируемой зоны, наличия условий для обеспечения электропитания, а также с учетом производственных планов развития рудника на срок службы системы.

Не менее важным фактором повышения точности определения гипоцентров сейсмических событий является применение максимально реалистичных моделей природной среды, в которой происходит распространение сейсмических волн. При проведении локального сейсмического мониторинга небольших объектов - когда ожидаемые эпицентральные расстояния (расстояние от сейсмической станции до источника) соизмеримы с линейными размерами элементов естественного или техногенного рельефа, как в случае карьеров или рудников, важно учитывать эти факторы при построении скоростных моделей и таблиц времен пробега объемных сейсмических волн. С этой целью для контролируемого района была разработана трехмерная модель среды, учитывающая как природный рельеф местности, так и объемы выбранной горной породы. Для локации сейсмических событий в такой модели среды были разработаны специальные алгоритмы, использующие не таблицы времен пробега волн, а таблицы так называемых «псевдоскоростей» для каждой станции в зависимости от азимута подхода волны, расстояния и глубины.

В итоге была создана сеть из 12 сейсмических станций. Регистрация колебаний грунта ведется велосиметрами NS-1 сопряженными с регистраторами геофизических сигналов "Ермак-5". Передача данных на сервер сбора и обработки выполняется в режиме реального времени по каналам сотовой связи. Для электропитания части сейсмических пунктов применяются автономные системы на основе ветрогенераторных установок.

Результаты эксплуатации АССМ ВР за 2020-2021 годы выявили зоны проявления природной сейсмичности в контролируемом районе. Накопление данных сейсмического мониторинга позволяет наблюдать сезонные вариации сейсмической активности. Полученные первые результаты эксплуатации системы будут положены в основу решений по снижению рисков ведения горных работ на карьерах Восточного рудника КФ АО "Апатит".

# Атмосферные ударные волны при входе астероидов в атмосферу: Венера, Марс, Земля

---

**Иванов Б.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН), Москва, Россия

e-mail: boris\_a\_ivanov@mail.ru

Высокоскоростной вход небольших астероидов в атмосферы планет создает атмосферные ударные волны, способные оставлять видимые следы на поверхности планет. На Земле это может быть повреждение зданий (см. Челябинский метеорит в 2013 г.) или обширный вывал леса (см. Тунгусский метеорит, 1908 г.). На Марсе даже разреженная атмосфера приводит к локальному перемещению поверхностной пыли, видимого как темные дуги, вытянутые на несколько километров, на Венере воздушные ударные волны от фрагментированных метеороидов создают характерные поверхностные детали. В данной работе обсуждаются детали и нерешенные проблемы взаимодействия воздушных ударных волн с поверхностями планет.

В плотной атмосфере Венеры ударники в широком диапазоне диаметров передают кинетическую энергию в атмосферные ударные волны. В некоторых случаях обломки разрушенного в атмосфере ударника способны достигнуть поверхности. Численные оценки показывают, что сейсмические волны от удара догоняют и обгоняют фронт атмосферной ударной волны. Следовательно, на определенном расстоянии от точки падения взаимодействие сейсмических колебаний поверхности и атмосферного ударного импульса с положительными и отрицательными фазами может создавать необычные следы на поверхности. Некоторые странные образования, видимые на венерианских радиолокационных изображениях, потенциально могут быть объяснены с помощью продолжения анализа взаимодействия сейсмических приповерхностных волн и ударных волн в атмосфере.

На Марсе детали, связанные с перемещением поверхностной пыли воздушными ударными волнами, могут дать важную информацию о строении приповерхностного слоя марсианского грунта.

Совместный анализ воздушных ударных волн на планетах земной группы позволяет использовать опыт, полученный при регистрации проникновения метеороидов в атмосферу Земли, для изучения поверхности Марса и Венеры по наблюдениям с космических аппаратов.



## Динамические режимы в модели конвекции нейтрального газа области F ионосферы при вынужденном гармоническом воздействии

---

Романов И.В., Григорьев Д.В., Платонова А.Т.

Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Москва, Россия

e-mail: romanov@ipg.geospace.ru

Методами численного моделирования исследуются режимы в модифицированной динамической системе Лоренца, описывающие распределение скорости движения и температуры конвективных валов с теплофизическими параметрами нейтрального газа области F ионосферы при внешнем гармоническом воздействии на температуру нейтрального газа. Модель нейтрального газа построена в приближении сосредоточенных параметров, т.е. в конвективной ячейке теплофизические параметры постоянны. При построении модели влияние геомагнитного поля на нейтральную компоненту через взаимодействие с ионами и электронами не учитывалось. Внешнее воздействие на динамическую систему осуществляется с помощью изменения параметров горизонтального и вертикального распределения температуры конвективных валов.

Исследуемая динамическая система при заданных параметрах без внешнего воздействия находится в состоянии равновесия. Однако при достижении некоторого порогового значения внешнего воздействия возникают длительные переходные процессы между динамическими и статическими режимами. Реализуются устойчивые и неустойчивые аттракторы, переход между которыми может реализовываться триггерным механизмом переключения. Под длительностью переходного процесса понимается отношение времени установления динамического режима или состояния равновесия к периоду собственных колебаний. Данная величина зависит от выбранного набора параметров и начальных условий и может варьироваться от нескольких десятков до сотен тысяч и более. Нахождение зависимости длительности установления переходного процесса от параметров является отдельной задачей и в данной работе не изучалось.

В настоящей работе рассчитаны фазовые портреты динамики нормированной скорости и температуры конвективных валов и характерные спектры Фурье. Рассчитаны карты устойчивости динамических режимов, позволяющие определить тип режима в зависимости от параметров динамической системы и внешнего гармонического воздействия.

## Влияние горных работ на сейсмоактивность массива пород подземных рудников Хибин

---

Каган М.М. (1), Козырев А.А. (1), Моторин А.Ю. (2), Стершнева А.А. (2)

(1) Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

(2) Кировский филиал АО «Апатит», г Кировск Мурманской обл., Россия

e-mail: ayumotorin@phosagro.ru

Приводятся результаты пространственно-временного анализа проявлений сейсмоактивности в массиве горных пород подземных рудников Хибин, обрабатываемых с применением системы поэтажного обрушения с торцевым выпуском руды. Анализ производился по результатам сбора данных сейсмического мониторинга, выполненного в период с 2019 по 2020 года на 2-х рудниках КФ АО «Апатит». Общий объем массива данных для анализа составил более 60000 событий, зарегистрированных в этот период времени сейсмостанцией КФ АО «Апатит». Анализ выполнялся на основе эмпирической функции оценки влияния взрывов.

Установлено, что в подавляющем большинстве случаев (порядка 80%) сейсмоактивность массива горных пород в шахтных полях рудников проявляется в местах ведения горных работ, где выполняются работы по проходке и очистной выемке с применением взрывов.

В результате анализа выявлены 2 группы формирования сейсмичности массива: сейсмичность в рабочих зонах, связанных с технологическими взрывными работами, и сейсмичность природная, определяющаяся структурно—геологическими факторами.

В целом, различие характеристик проявления сейсмичности для этих двух групп сейсмических событий состоит в следующем:

1. Сейсмоактивность после взрывных работ затухает по времени, аналогично афтершокам после сильных землетрясений. При этом сейсмические события, произошедшие с малым временем задержки от момента взрыва, т.е. такие, которые могут являться результатом непосредственного воздействия ударных волн от взрывов, в анализируемых данных практически отсутствуют.

2. При приближении фронта очистных работ, взрывы активизируют участки в шахтном поле, находящихся в состоянии близком к предельно-напряженному в виде пространственно-компактных кластеров сейсмособытий.

3. Сейсмоактивность в зоне влияния технологических взрывов представлена менее энергетичными сейсмособытиями по сравнению с сейсмоактивностью за её пределами (угол наклона графика повторяемости b-value для сейсмособытий в зоне влияния технологических взрывов в 2 раза больше, чем за её пределами).

Существенные различия в характеристиках сейсмоактивности в выявленных зонах можно интерпретировать следующим образом: сейсмоактивность в зоне влияния технологических взрывов связывается с процессами трещинообразования при перераспределении напряжений в процессе добычных работ, в то время, как вне зоны влияния взрывов сейсмоактивность определяется тектоническими процессами и процессами, связанными с глобальной перестройкой напряженно-деформированного состояния породного массива по мере отработки месторождения.

## **Активные эксперименты в ионосфере на высотах 140-360 км с использованием субальфвеновской плазменной струи с высоким $\beta$**

---

**Зецер Ю.И., Гаврилов Б.Г., Ковалев А.Т., Лосева Т.В., Ляхов А.Н.,  
Поклад Ю.В.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН), Москва, Россия

e-mail: zetzerj@hotmail.com

Ионосфера, как среда, представляет собой сложную неоднородную систему, состоящую из заряженных и нейтральных частиц, погруженных в магнитное поле, и простирающуюся  $\sim$  от 60 до 1000 км. Динамика нейтрального газа ионосферы описывается уравнениями нейтральной жидкости, ионизованного - уравнениями динамики плазмы в магнитном поле. Дополнительно должны быть учтены также процессы, определяемые химией ионов и нейтралов, а также фотохимией. В докладе рассматриваются явления, сопутствующие разлету плазменной струи в окружающую ионосферу. При этом воспроизводятся эффекты, которые могут возникать в природных условиях, например, при электрических разрядах, при инъекции солнечной корональной массы, при взрывных процессах в астрофизике, также, как и при некоторых техногенных возмущениях. Активные эксперименты в ионосфере с использованием субальфвеновской плазменной струи с высоким  $\beta$  позволили уточнить феноменологию и физические механизмы, определяющие указанные выше геофизические процессы. В докладе обсуждаются результаты и дается интерпретация следующих экспериментальных данных: инерционный разлет струи с учетом генерируемого УФ-ИК излучения, формирование и динамика диамагнитной полости, генерация плазменных и электромагнитных волн, а также динамика ионов струи и фона с учетом влияния диамагнитной полости. Поскольку процессы, протекающие при взаимодействии плазменной струи с ионосферой отличаются большим диапазоном времен: от микросекунд до десятков секунд, их диагностика требует привлечения широкого круга датчиков, расположенных, как вблизи области взаимодействия - на борту ракеты, так и дистанционно - на поверхности Земли и на спутнике. В докладе приводятся краткие характеристики датчиков и приборов, с помощью которых измерялись указанные механизмы в области газодинамики, магнитной гидродинамики, измерения электромагнитных полей, динамики частиц.

# Отклик спектра тремора земной поверхности в районе добычи сланцевой нефти

Любушин А.А. (1), Родкин М.В. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: lyubushin@yandex.ru

Из весьма общих теоретических соображений можно ожидать, что изменения характеристик шумов динамической системы отражают степень ее неравновесности, приближения или удаления состояния системы от ситуации бифуркации. Одной из таких характеристик является наклон спектра шума системы в двойных логарифмических координатах [Родкин и др., 2007; Lyubushin, Yakovlev, 2014; Lyubushin, 2019]. Применительно к сейсмическим шумам, регистрируемым низкочастотными датчиками или GPS приемниками, изменения ряда характеристик шумов рассматривались в работах [Filatov, Lyubushin, 2019; Lyubushin, 2019]. В ряде случаев эти изменения интерпретировались как предвестниковый признак сильного землетрясения. Так, в частности, было спрогнозировано мега-землетрясение Тохоку [Lyubushin, 2018].

Определенной сложностью интерпретации результатов таких расчетов является то, что действующий фактор остается неизвестным. Такой действующий фактор можно полагать, однако, известным в случае интенсивной добычи сланцевых УВ. При этом достаточно детально регистрируется также и вызванная сейсмичность, режим которой также характеризует степень неустойчивости системы и опасность реализации более сильного землетрясения.

В работе приводятся результаты анализа шумового поля GPS деформаций области интенсивной добычи сланцевой нефти (Оклахома, США) совместно с данными по режимам закачек. Сейсмический режим этой области анализировался в [Vorobieva et al., 2020], где была показана связь сейсмичности с режимом закачек.

Нами показана сильная пространственная масштабнo-зависимая корреляция между интенсивностью закачек и коэффициентом корреляции между спектральным наклоном GPS тремора и объемами закачек. Интересным и неочевидным результатом является факт отрицательности корреляций. Таким образом, увеличение объема закачек приводит к уменьшению наклона спектра мощности GPS тремора, что интерпретируется как уменьшение вклада низких частот. Заметим, что использование для оценки текущей сейсмической опасности анализа шумов имеет, по сравнению с методом, основанным на мониторинге сейсмичности, то преимущество, что анализ шумов допускает регулярность и непрерывность мониторинга, недоступные из-за относительной редкости сейсмических событий.

Родкин М.В., Слепнев А.С., Родкин М.М. Возможный подход к оценке и прогнозу изменений устойчивости геосистем по изменениям характера шумовых колебаний. В сб.: Синергетика геосистем. М., 2007, 32-36.

Lyubushin A. and Yakovlev P. (2014) Properties of GPS noise at Japan islands before and after Tohoku mega-earthquake. SpringerPlus 2014, 3:364 doi:10.1186/2193-1801-3-364, <http://www.springerplus.com/content/3/1/364>

Lyubushin A. (2018) Synchronization of Geophysical Fields Fluctuations // Tamaz Chelidze, Luciano Telesca, Filippos Vallianatos (eds.), Complexity of Seismic Time Series: Measurement and Applications, Elsevier 2018, Amsterdam, Oxford, Cambridge. Chapter 6. P.161-197. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813138-1.00006-7>

Filatov D.M., Lyubushin A.A. (2019) Precursory Analysis of GPS Time Series for Seismic Hazard Assessment. Pure and Applied Geophysics. First Online: 07 January 2019, 177(1), 509-530.

<https://doi.org/10.1007/s00024-018-2079-3>

Lyubushin, A. (2019) Field of coherence of GPS-measured earth tremors. *GPS Solutions* (2019) 23:120. First Online: 27 September 2019. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0909-0>

Vorobieva I., Shebalin P., Narteau C. Condition of Occurrence of Large Man-Made Earthquakes in the Zone of Oil Production, Oklahoma. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020;56(6):911–919. DOI: 10.1134/S10693513200601309

## О дисперсии сейсмических волн

---

**Арсеньев С.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия

e-mail: arsenyev@yandex.ru

Регистрируемый сейсмографами цуг волн от землетрясения обычно состоит из четырех волн различного генезиса: P - волн продольного сжатия и разряжения, S - поперечных волн, R - рэлеевских поверхностных волн и L - волн Лява. Они прибывают на сейсмическую станцию последовательно и все вместе образуют пакет волн, вызывающих землетрясение. Все эти волны считаются без дисперсионными за исключением волн Лява, которые из-за дисперсии распадаются на гармонические составляющие и довольно быстро затухают. В настоящей работе мы изучаем дисперсию поперечных S - волн. Она появляется из-за трения, которое различным образом действует на волны отличающейся частоты.

Исходным является волновое уравнение с трением (телеграфное уравнение). С его помощью можно получить дисперсионное соотношение, связывающее частоту, фазовую скорость и волновое число. В случае линейного закона дисперсии фазовая скорость от волнового числа не зависит, среда является не диспергирующей, волны в ней распространяются без искажения, фазовая и групповая скорости совпадают. Это имеет место при отсутствии трения. Если трение есть, появляется дисперсия, волновой пакет расплывается, закон дисперсии нелинеен, фазовая и групповая скорости различны. В общем случае поведение пакета сейсмических волн определяется тангенсом угла потерь: отношением частоты трения к частоте волны. Для слабо затухающих волн и малого трения или для высоко частотных волн, тангенс угла потерь мал и имеет место акустическая аналогия: дисперсии нет, но диссипация частотно-зависимая. Наоборот, при сильном затухании или для низкочастотных волн, мы имеем оптическую аналогию: величина потерь и фазовая скорость существенно зависят от частоты, причем возможен случай, когда высокочастотные (короткие) волны бегут быстрее низкочастотных (длинных) волн.

## Сейсмогидрогеологические явления как проявление триггерного воздействия сейсмичности на гидросферу

---

Копылова Г.Н., Болдина С.В.

Федеральное государственное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук Камчатский филиал, Петропавловск-Камчатский, Россия

e-mail: gala@emsd.ru

В течение десятилетий в науках о Земле сохраняется интерес к изучению триггерного воздействия землетрясений на подземные воды. Разнообразие сейсмогидрогеологических эффектов проявляется в изменениях уровней, расходов, температуры и гидрогеохимии подземных вод и не имеет исчерпывающего объяснения до настоящего времени. Однако очевидно, что важную роль в многообразии сейсмогидрогеологических проявлений имеют природные условия формирования, а также гидрогеодинамические и газогидрогеохимические характеристики подземных вод отдельных наблюдательных скважин и родников.

Сильные землетрясения в одном и том же месте случаются довольно редко, и для всестороннего изучения сейсмогидрогеологических эффектов необходимы детальные и длительные наблюдения за режимом скважин и родников. Рассмотрение сейсмогидрогеологических эффектов основывается на выделении отдельных составляющих воздействия землетрясения на подземные воды. К таким составляющим относятся (1) изменение напряженно-деформированного состояния водоносных пород при подготовке землетрясения, (2) образование разрыва в очаге землетрясения и изменение статического напряженного состояния водоносных пород, (3) динамическое деформирование водоносных пород под вибрационным воздействием сейсмических волн и другие.

Изучение реакции подземных вод на землетрясения позволяет характеризовать свойства водонасыщенных пород и их вариации в различных пространственных и временных масштабах, что способствует надежному управлению водными ресурсами, экологическим состоянием окружающей среды в сейсмоактивных регионах и изучению сейсмических эффектов в геофизических полях. Новые идеи и модели, объясняющие реакцию подземных вод на сейсмические процессы, также способствуют эффективному поиску и практическому использованию гидрогеодинамических и гидрогеохимических предвестников в прогнозировании землетрясений.

Современное состояние исследований сейсмогидрогеологических эффектов ориентировано на решение комплекса научно-исследовательских задач:

- а) систематический анализ и создание моделей сейсмогидрогеологических сигналов в изменениях подземных вод по данным детальных наблюдений;
- б) разработка методов оценки качества данных наблюдений в скважинах и других водопрооявлениях для создания и проверки моделей воздействия землетрясений на подземные воды;
- в) геофизическая интерпретация сейсмогидрогеологических эффектов совместно с другими сейсмологическими и несейсмологическими аномалиями, связанными с деформацией земной коры;
- г) статистический анализ временных рядов гидрогеодинамических, газогидрогеохимических и изотопных параметров подземных вод для оценки пространственно-временных масштабов сейсмогидрогеологических эффектов на фоне природных и техногенных процессов;
- д) оценка статистической значимости гидрогеодинамических и гидрогеохимических предвестников землетрясений для прогноза землетрясений.

В последние годы важное значение приобретают обзоры результатов многолетних наблюдений за сейсмогидрогеологическими эффектами в различных сейсмоактивных регионах и природных условиях. Критическая переоценка таких многолетних данных в сочетании с современными

данными наблюдений позволяет выявлять новые перспективные направления исследований сейсмического воздействия на подземные воды и оценивать их практическую значимость.



## Численное моделирование падения крупных астероидов в океан

---

**Шувалов В.В.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской Академии Наук, Москва, Россия

e-mail: valeryvshuvalov@gmail.com

Более двух третей поверхности Земли покрыто морями и океанами. Поэтому большая часть космических тел, сталкивающихся с Землей, падает в воду. При ударах космических тел по твердой поверхности основными поражающими факторами являются ударная волна, вызывающая массовые разрушения, и излучение, вызывающее массовые пожары. Выброс вещества в атмосферу определяет долговременные последствия. При падении космических тел в океан разрушения ударной волной и массовые пожары не так актуальны. Поэтому основными поражающими факторами для таких ударов являются волны цунами и выброс вещества мишени и ударника в атмосферу, на который заметно влияет наличие слоя воды. Эти два эффекта и рассматриваются в данной работе.

Проведенные расчеты показывают, что даже при падении десятикилометровых астероидов в океан в атмосферу выбрасывается большое количество вещества грунта. При глубинах вплоть до 3 км максимальная масса выброшенного в атмосферу вещества грунта не более, чем в 2-3 раза отличается от массы выбросов при падении астероида на твердую поверхность. Более того расчеты показывают, что масса вещества грунта, остающаяся в атмосфере после осадения в поле тяжести при глубинах до 5 км даже больше, чем при падении на твердую поверхность. И только при глубинах порядка 7 км и больше (при падении астероида в хадальную зону, составляющую около 1% от поверхности Земли) выбросы твердого вещества заметно уменьшаются по сравнению с выбросами при падении астероидов на сушу. Кроме того, при ударах в воду в атмосферу выбрасывается большое количество воды и содержащихся в ней солей. Таким образом можно сделать вывод, 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.

Проведенные расчеты показывают, что при ударах космических тел, размеры которых больше глубины океана, наличие слоя воды слабо влияет на процесс формирования и размеры донного кратера, а волна цунами образуется, главным образом, за счет «сгребания» воды конусом выбросов из кратера в грунт. На расстояниях более 1000-3000 км волна цунами становится линейной и в дальнейшем затухает по закону  $\sim r^{-1/2}$ , где  $r$  – расстояние от точки падения, что соответствует теории мелкой воды. На меньших расстояниях волна заметно нелинейна и затухает быстрее. Чем больше глубина океана и размер ударника, тем дольше длится нелинейная стадия. Таким образом, можно сделать вывод, что падении в океан астероидов размером порядка 10 км на расстояниях 1000-3000 км от точки удара формируются волны цунами длиной более 100 км, похожие на цунами, генерируемые землетрясениями.

# Мониторинг деформационных процессов на подземных хранилищах газа спутниковыми и наземными методами измерения

---

**Фаттахов Е.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта  
Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва, Россия

e-mail: fea@ifz.ru

Необходимость создания геодинамического полигона на подземном хранилище газа (ПХГ) обусловлено различными факторами. Циклические воздействия на недра, путём закачки и отбора газа, приводят к изменению напряженно-деформируемого состояния земной коры, что в свою очередь формирует поднятие и опускание земной поверхности во времени, а также к активизации суперинтенсивных аномалий в разломных зонах [4; 5; 6].

Правильно организованная система наблюдений позволяет фиксировать текущую геодинамическую обстановку и учитывать проявление геодеформационных процессов не только на ПХГ, а на любых месторождениях нефти и газа [1; 2; 3].

В докладе речь пойдёт про сравнительный анализ результатов наблюдений полученных на различных подземных хранилищах газа методами геометрического нивелирования, GPS и спутниковой радарной интерферометрией. Будут показаны итоговые результаты четырех циклов измерений, а также достоинства и недостатки каждого метода.

Литература:

Гатиятуллин Р.Н., Кузьмин Д.К., Фаттахов Е.А. Анализ результатов многолетних геодезических наблюдений на месторождении свехвязкой нефти, Юго-Восток Татарстана // Наука и технологические разработки. 2021. Т. 100. № 4. С. 5-24.

2. Квятковская С.С., Фаттахов Е.А. Сравнительный анализ деформационных процессов на подземных хранилищах газа // Проблемы недропользования. 2019. № 4 (23). С.38-48.

3. Кузьмин Ю.О. Деформационные последствия разработки месторождений нефти и газа // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20, № 4. С.103-121.

4. Кузьмин Ю.О. Индуцированные деформации разломных зон // Физика Земли. 2019. № 5. С.61-75.

5. Кузьмин Ю.О., Фаттахов Е.А. Тензометрический метод анализа результатов наблюдений на геодинамических полигонах // Маркшейдерский вестник. 2016. № 5 (114). С.22-25.

6. Кузьмин Ю.О., Фаттахов Е.А. Анализ повторных нивелирных наблюдений в зонах разломов методами теории деформаций // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23, № 4. С. 67-84.

## Закономерности термостимулированной акустикоэмиссионной активности

---

Индаков Г.С. (1), Казначеев П.А. (2), Майбук З.Я. (2), Пономарев А.В. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Москва, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: indakov.gs16@physics.msu.ru

Одной из актуальных проблем физики Земли на сегодняшний день является изучение вулканической сейсмичности. Она тесно связана с процессами трещинообразования, вызываемыми происходящими под вулканами движениями магмы. Для лучшего понимания этих процессов активно проводятся полевые и модельно-лабораторные исследования.

В настоящей работе было проведено сравнение особенностей процессов термически стимулированного разрушения горных пород разного происхождения на основе статистики импульсов термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) в лабораторных экспериментах с образцами магматических пород интрузивного (граниты) и эффузивного (базальты) классов. Эксперименты с образцами горных пород проводились на специализированной нагревательной установке; параметры импульсов ТАЭ определялись с помощью регистрирующей системы «A-Line 32D». Нагрев осуществлялся до температур  $700^{\circ}\text{C}$  (максимально) со скоростью около  $2\text{--}3^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . Исследуемые образцы представляют собой цилиндрические фрагменты породы высотой 6 см с диаметром основания 3 см. Так как базальты характерны для вулканических построек, а граниты – для сейсмогенерирующих зон, эксперименты с образцами этих пород представляют наибольший интерес.

Для анализа развития разрушения в целом были рассмотрены такие статистические параметры, как активность акустической эмиссии и параметр наклона графика повторяемости событий ( $b$ -value), оценённый методами линейной регрессии и максимального правдоподобия. Для выявления локальных этапов разрушения были рассмотрены максимальный энергетический класс события ТАЭ и интенсивность выделения энергии. Дополнительно была произведена оценка плотности термической энергии и термомеханических напряжений в исследуемых образцах.

Анализ данных экспериментов показал различный характер изменения активности акустической эмиссии со временем и в зависимости от температуры для разных образцов. С учётом этого эксперименты были систематизированы по типу активности для возможности сравнения результатов. Анализ локальных этапов эксперимента выявил наличие эпизодов активизации процессов разрушения. Параметр  $b$  был пересчитан для сопоставления с натурными данными. Была обнаружена закономерность: для образцов с высокой активностью акустической эмиссии  $b$ -value оказывается меньше. Для объяснения выявленных закономерностей изменения  $b$ -value предложена интерпретация результатов в рамках модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ). Общий характер исследуемых параметров для рассматриваемых образцов не обнаруживает зависимости от типа породы и типа активности акустической эмиссии.

Экспериментальные данные получены в рамках гос. задания ИФЗ РАН.

## Эрозия поверхности морского дна как триггер эволюции поддонных скоплений газовых гидратов

---

Суетнова Е.И.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), Москва, Россия

e-mail: elena\_suetnova@mail.ru

Влияние быстрой эрозии поверхности морского дна на процесс эволюции газовых гидратов в подлежащих слоях морского дна был изучен с помощью математического моделирования с использованием современных экспериментальных данных. Динамика движений ледников и айсбергов в северных морях в ряде случаев приводит к выпахиванию киллями айсбергов поверхностных слоёв морских осадков. В этих случаях возможны детектированные разными методами наблюдаемые выбросы газов в процессе выпахивания и торошения дна. Но процесс выпахивания килем айсберга поверхностных слоёв морского дна может также быть триггером процесса разложения газовых гидратов в подлежащих более глубоких слоях осадков. При каких условиях этот процесс развивается и каковы могут быть количественные характеристики такого процесса и скорости и времени его развития в данной работе исследуются методами математического моделирования. Численно и аналитически решались совместно уравнение теплопроводности и уравнение пьезопроводности при использовании репрезентативных значений входящих параметров. Количественно проиллюстрирована определяющая роль градиента порового давления и температуры в осадках до момента выпахивания, т.е. определены возможные потенциальные условия инициирования разложения газовых гидратов в глубинных зонах осадочного слоя процессом выпахивания на поверхности. Также изучены случаи процесса эрозии не приводящие к разложению поддонных газовых гидратов а приводящие только к наращиванию зоны термобарической стабильности газовых гидратов в морском дне. Показано также как инициированный движением айсберга (ледника) процесс разложения гидратов вызывает фильтрацию газа к поверхности дна и наблюдаемые подводные факелы метана, в некоторых случаях представляющие серьёзную опасность для подводных работ или исследований.

## Сейсмическая регистрация оползней из района Тянь-Шаня

---

Соколова И.Н. (1), Берёзина А.В. (2), Першина Е.В. (2), Соколова Н.П. (2)

(1) Филиал “Институт геофизических исследований” РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

(2) Институт сейсмологии НАН КР, Бишкек, Кыргызстан

e-mail: sokolova.inessa@mail.ru

Иногда сейсмические станции Казахстана и Кыргызстана регистрируют необычные явления, связанные с экзогенными геологическими процессами, например, оползнями, снежными лавинами, камнепадами и селевыми потоками. Оползни могут быть обусловлены как тектоническими процессами, так и геологическими, геоморфологическими и гидрогеологическими условиями, а также воздействием комплекса антропогенных факторов.

В Кыргызстане и Казахстане каждый год сходят сотни оползней, большинство из них небольшого объема, однако в последнее время участились случаи мощных, катастрофических оползней с объемом больше миллиона кубометров. По записям сейсмических сетей Кыргызстана (KRNET, KNET, ЦАИИЗ) рассмотрены особенности волновой картины мощных оползней 1 декабря 2019 г. в районе золоторудного месторождения Кумтор объемом 12 млн 825 тыс. кубометров и 4 сентября 2020 г. в районе угольного месторождения Кара-Кече в Нарынской области Кыргызской Республики объемом 800-900 тысяч кубометров. Определены параметры сейсмических событий, обусловленных сходом оползней, такие как время в очаге, координаты, магнитуда. Проведено сравнение с записями оползней в районе Заилийского Алатау, вблизи г. Талгар, весной 2004 г., а также мощного оползня в Национальном природном парке «Кольсайские озера» 18 апреля 2018 г. (45-50 миллионов кубометров), зарегистрированных казахстанскими станциями. Изучены динамические и кинематические параметры записей необычных сейсмических событий. Показано, что волновая картина оползней имеет ряд схожих черт. Прослеживается зависимость магнитуды события от объема сошедшей массы. Исследованы вероятные факторы, обусловившие сход оползней. Показано, что оползни в районах месторождений Кара-Кече и Кумтор обусловлены антропогенной деятельностью.

## **Характеристики геодинамических процессов в районе Семипалатинского испытательного полигона по данным о поглощении короткопериодных поперечных волн**

---

**Копничев Ю.Ф. (1), Соколова И.Н. (2)**

(1) Институт физики Земли Российской Академии наук, Москва, Россия

(2) Филиал “Институт геофизических исследований” РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

e-mail: yufk777@mail.ru

По записям калибровочных химических взрывов в районе Семипалатинского испытательного полигона (СИП), полученным близкими станциями, изучена структура поля поглощения в областях площадок Балапан и Дегелен. Анализировались характеристики огибающих короткопериодной волны (на частотах 1.25 и 5 Гц). Показано, что в области Балапана, где проходят две крупные разломные зоны, наблюдается аномально высокое поглощение S-волн в нижней коре и верхах мантии. В области Дегелена на таких глубинах поглощение существенно более низкое.

По записям более 260 подземных ядерных взрывов (ПЯВ), полученных станцией TLG, расположенной на Северном Тянь-Шане, на расстояниях 730-770 км от эпицентральной зоны, изучены временные вариации отношения амплитуд волн Lg и Pg (параметра Lg/Pg). Установлено, что данный параметр изменяется во времени существенно различным образом для площадок Муржик, Дегелен и Балапан. Для взрывов на Балапане наблюдается существенное увеличение поглощения S-волн в земной коре в 80-х годах. Рассмотрены временные вариации параметра Lg/Pg по записям карьерных взрывов, проводившихся начиная с 2002 г. к северу от площадки Балапан и зарегистрированных станцией МКАР, расположенной в районе восточного Казахстана. Показано, что величина указанного параметра растет с 2002 по 2006 гг., а далее, до 2021 г. находится приблизительно на одном уровне.

Предполагается, что пространственно-временные вариации структуры поля поглощения связаны с подъемом ювенильных флюидов по крупным разломным зонам, обусловленным длительным интенсивным воздействием мощных взрывов, и дальнейшей миграцией их в горизонтальном направлении. Такой механизм позволяет объяснить также существование крупной тепловой аномалии в районе северо-восточного Казахстана, включающего СИП.

## **Кольцевые структуры сейсмичности в районе юго-западной Аляски: оправдавшиеся прогнозы мест и магнитуд Симеоновского (22.07.2020 г., Mw=7.8) и Чигникского (29.07.2021 г., Mw=8.2) землетрясений**

---

**Копничев Ю.Ф. (1), Соколова И.Н. (2)**

(1) Институт физики Земли Российской Академии наук, Москва, Россия

(2) Филиал “Институт геофизических исследований” РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

e-mail: yufk777@mail.ru

Рассматриваются некоторые характеристики сейсмичности в районе Юго-Западной Аляски. Выделяются афтершоковые зоны Симеоновского (Mw=7.8) и Чигникского (Mw=8.2) землетрясений. Отметим, что Чигникское землетрясение было наиболее сильным сейсмическим событием, произошедшим на территории США после 1965 г. Описываются характеристики мелких ( $h=0-33$  км) и глубоких ( $h=34-70$  км) кольцевых структур сейсмичности, сформировавшихся в течение нескольких десятков лет перед этими событиями. По параметрам этих структур (пороговым значениям магнитуд и длинам больших осей) были сделаны прогнозы мест и магнитуд сильных землетрясений, которые могли готовиться в области Шумагинской сейсмической брешы и к востоку от нее. Прогнозные оценки магнитуд ( $Mw=7.9\pm 0.3$  и  $8.2\pm 0.2$  соответственно) были получены по корреляционным зависимостям, связывающим параметры кольцевых структур с магнитудами сильных и сильнейших землетрясений для восточной части Тихого океана. Прогнозы мест и магнитуд рассматриваемых событий были приведены в статьях, опубликованных соответственно в 2012 и 2021 гг. Рассматриваются возможные изменения параметров кольцевых структур непосредственно перед Симеоновским и Чигникским землетрясениями. Резкое увеличение уровня сейсмичности в области мелкой кольцевой структуры за год до Чигникского землетрясения может рассматриваться в качестве триггера, свидетельствующего об ускорении процессов подготовки сильного события. В то же время перед Симеоновским землетрясением не наблюдалось аналогичного эффекта. Обсуждаются геодинамические процессы, которые могут приводить к формированию кольцевых структур. Полученные в работе, а также ранее данные свидетельствуют о важной роли глубинных флюидов в процессах подготовки сильных землетрясений в зонах субдукции.

## Режим сезонной сейсмичности в области Койна-Варна: полевые данные и лабораторные эксперименты

---

Смирнов В.Б. (1, 2), Пономарев А.В. (1), Патонин А.В. (1), Chadha R.K. (3)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», физический факультет, Москва, Россия

(3) CSIR-National Geophysical Research Institute, Hyderabad, India

e-mail: vs60@mail.ru

На основе анализа каталога землетрясений в области триггерной сейсмичности Койна-Варна в Западной Индии за всю историю сейсмологических наблюдений в этом районе выявлены сезонные компоненты сейсмической активности, связанные с годовыми колебаниями уровня воды в водохранилищах, обнаружены особенности пространственно-временной динамики этих компонент. Сезонные колебания сейсмической активности, связанные с годовыми вариациями уровня воды в водохранилищах, демонстрируют локальные максимумы в пределах года, отвечающие механизмам немедленного и задержанного отклика резервуарной сейсмичности. Для их объяснения выдвинута гипотеза о различии скоростей диффузии флюида на разных стадиях эволюции сезонной сейсмичности. В пределах годового цикла колебаний сейсмичности выявлены закономерные изменения наклона графика повторяемости землетрясений и высказаны предположения об их природе. Характер изменения сейсмической активности в совокупности с наклоном графика повторяемости свидетельствует о реализации сценария перераспределения процесса разрушения от младших к старшим масштабным уровням. Для проверки гипотез и предположений, выдвинутых по результатам анализа натуральных данных, проведены лабораторные исследования особенностей флюидной инициации разрушения в горных породах (в том числе, на кернах из скважин в области Койна-Варна). Выявлено различие задержек активизации акустической эмиссии при внедрении флюида в сухие образцы и при повышении порового давления в насыщенных флюидом образцах, рассмотрены причины выявленных различий. При плавных изменениях порового давления флюида в насыщенных образцах обнаружены закономерности изменения акустического режима, аналогичные обнаруженным в сезонной сейсмичности Койна-Варна. Лабораторные результаты подкрепляют, таким образом, выводы натуральных исследований триггерной сейсмичности.

Лабораторные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования ИФЗ РАН.



## Эволюция проницаемости горных пород в процессе разрушения

---

Пономарев А.В. (), Смирнов В.Б. (1), Фокин И.В. (1, 2), Патонин А.В. (1), Шаталина Е.И. (1), Сергеев Д.С. (2), Леонова А.М. (1), Егоров Н.А. (1)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

e-mail: avp@ifz.ru

Экспериментально исследована изменчивость проницаемости образцов осадочных и изверженных горных пород (керны диаметром 30 мм и высотой 60 мм) при всестороннем сжатии и одноосном нагружении вплоть до разрушения. Проницаемость определялась на регулярной основе методом стационарного потока флюида (constant flow-rate method) при градиенте давления фильтрующейся жидкости 1 МПа. Значения проницаемости вычислялись на основе закона Дарси в предположении ламинарности потока флюида. Давление всестороннего сжатия поддерживалось на уровне 20 или 30 МПа, а средняя скорость деформирования составляла около  $0.2 \times 10^{-7}$  1/с. Эксперименты выполнялись в режиме ступенчатого нагружения с управлением по величине деформации (strain control), при этом величина деформационных ступеней составляла около  $8.3 \times 10^{-4}$  (смещение поршня пресса 50 мкм). В качестве нагружающих машин использовались сервоуправляемые комплексы GCTS RTR 4500 и Z 1000 ИНОВА. Методика проведения опытов обеспечивала получение полной реологической кривой – от упругой области до формирования узкой зоны микротрещиноватости на этапе деформирования за пределом прочности. В результате были получены оценки динамики изменчивости проницаемости на всем интервале нагружения. Длительность отдельного эксперимента достигала 3 суток, что при частоте измерения проницаемости каждые 40 минут позволяло получить детальную картину изменения этого параметра по мере развития разрушения. Показано, что изменения проницаемости носят закономерный характер для всех типов исследованных пород и определяются, в основном, возникновением и развитием популяции трещин в условиях полного насыщения образцов флюидом. На этапе упругого деформирования проницаемость задаётся первичной структурой породы и незначительно меняется с ростом напряжений. Далее, по мере приближения к пределу прочности и переходу материала к неупругому поведению, проницаемость заметно увеличивается и может возрасти на 1–2 порядка по сравнению с первичной матричной (около 10 мкДа). После образования зоны макроразрушения и падения осевой нагрузки проницаемость почти не меняется, оставаясь на высоких значениях. Естественно предположить, что эти изменения обусловлены образованием и ростом дефектов (микротрещин). Динамика трещинообразования может быть выявлена по наблюдениям за акустической эмиссией (АЭ). Мы исследовали акустические режимы на образцах-близнецах песчаников (вырезанных из одного исходного керна) для сопоставления изменения проницаемости и параметров акустического режима при подготовке макроразрушения. Обнаружено, как и в ранее проведенных опытах, что акустическая активность возрастает на этапе перехода от упругого поведения к пределу прочности, что хорошо коррелируется с изменением проницаемости. Анализ амплитудного распределения АЭ показал, что энергия событий закономерно увеличивается по мере формирования макроразрушения. Это подтверждает реализацию сценария роста размеров трещин и их слияния, приводящего к образованию крупной сложно построенной зоны трещиноватости, которая обеспечивает относительно высокие значения проницаемости при низких значениях акустической активности предположительно за счет роста площади образующихся микротрещин. Возможно, дополнительный вклад в этот сценарий вносит флюидное воздействие, которое понижает прочность деформируемой породы. В таком случае увеличение проницаемости на стадии

слияния и роста трещин может вносить дополнительный вклад в формирование «положительной обратной связи», обеспечивающей согласно концепции ЛНТ лавинообразное развитие процесса разрушения. Исследование эволюции проницаемости по уже сформированной зоне «разлома» в условиях сдвига осложняется неоднородным распределением нормальных напряжений, морфологией рельефа поверхности, скоростью скольжения, величиной сдвигового смещения, процессами залечивания трещин, диффузии флюида и т. д., учёт которых требует специальных экспериментов. Изучение изменчивости проницаемости в трещиноватых, тектонически активных зонах представляет не только фундаментальный, но и прикладной интерес, учитывая эффекты наведённой сейсмичности.

Лабораторные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования ИФЗ РАН.

## **Индукцированная сейсмичность в районе Восточного Казахстана по данным казахстанской сети мониторинга**

---

**Аристова И.Л., Соколова И.Н., Великанов А.Е.**

филиал “Институт геофизических исследований” Национального ядерного Центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

e-mail: i.aristova@kndc.kz

Институт геофизических исследований Национального ядерного Центра РК проводит непрерывный сейсмический мониторинг событий различной природы на территории Казахстана, начиная с 1994 г. В последние годы возросло внимание к изучению сейсмического режима района Восточного Казахстана и западного Алтая. Интерес обусловлен прежде всего наличием действующих исследовательских атомных реакторов ИГР и ИВГ1.М, инфраструктуры бывшего ядерного Семипалатинского полигона, Банка низкообогащенного урана, хвостохранилищ, добывающих производств и др. В связи с этим, оценка сейсмической опасности региона является актуальной задачей. При изучении сейсмического режима Восточного Казахстана был выявлен ряд землетрясений, приуроченных к местам активного техногенного воздействия, таких как месторождения твердых полезных ископаемых, Семипалатинский испытательный полигон.

В работе приводятся данные об индуцированной сейсмичности вблизи крупнейших месторождений угля, золота, а также в районе Семипалатинского испытательного полигона. На территории СИП 2005-2010 гг., а также 2018-2021 гг. была установлена сеть полевых сейсмических станций, которая позволила детально изучить сейсмичность региона. Было показано, что спустя 30 лет после ядерных испытаний в районе площадки «Дегелен» регистрируются сейсмические события малой энергии вблизи боевых штолен.

Рассмотрены макросейсмические проявления наиболее сильных техногенных землетрясений, проведен сравнительный анализ волновых форм событий различной природы, приведены гипотезы о наиболее вероятных причинах техногенной сейсмичности. Показана необходимость создания более плотной сети наблюдений в Восточном Казахстане и системы раннего предупреждения в районах размещения исследовательских ядерных реакторов.

# Пространственно-временные вариации сейсмичности в районе Саамского разлома Хибинского массива

---

Козырев А.А., Жукова С.А., Журавлева О.Г.

Горный институт - обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» , Апатиты, Россия

e-mail: svetlana.zhukowa@yandex.ru

Разработка апатит-нефелиновых месторождений на Кольском полуострове ведется в удароопасных условиях. Отработка месторождений началась в 1929г. открытым способом. На сегодняшний день проводится отработка запасов Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений Кировского рудника подземным способом, которые разделяет Саамский карьер (добычные работы в карьере завершены). Подземные горные работы практически подошли к конечному контуру карьера, а проходческие - уже пересекли Саамский разлом, вскрытый карьерной выемкой.

Территория Кировского рудника контролируется автоматизированной системой контроля состояния массива, что позволяет исследовать динамику сейсмичности при ведении горных работ в сложных горно-геологических условиях. На сейсмический режим месторождений существенно оказывают влияние сочетание нескольких факторов: высокий уровень тектонических напряжений, блочный трещиноватый вмещающий массив, геологические жесткие включения в породном массиве (дайки, жилы и др.), очистные работы, динамическое воздействие взрывов, водопритоки и др.. Несмотря на очевидные особенности проявления сейсмичности, связанной с тем или иным влияющим фактором (или несколькими факторами), для проведения детальных исследований необходима систематизация сейсмических данных методом кластерного анализа, что делает анализ сейсмичности более надежным.

Авторами выполнен анализ сейсмичности с использованием пространственно-временной кластеризации с целью выявления возможных влияющих факторов и механизмов разрушения массива горных пород. При проведении исследований предполагается, что сейсмические события – это локальные разрушения в массиве горных пород (например, подвижка по микротрещине или формирование новой микротрещины).

Рассматривается динамика сейсмичности в районе Саамского разлома за одиннадцатилетний период (2008-2018гг.).

За рассматриваемый период в этом районе произошло 50 сильных сейсмических событий, из них 46 событий энергетического класса  $K=6$  и 4 события –  $K=7$ . Некоторые подземные толчки ощущались на территории промплощадки Кировского рудника.

С учетом кластеризации сейсмичности и во времени, и в пространстве проведен анализ местоположения кластеров (или групп кластеров) и возможных причин их возникновения.

Установлено, что вблизи разлома сейсмическая активность в основном приурочена к лежащему боку рудной залежи, но при этом проявляются сильные события и в других частях разлома, что может свидетельствовать об активности разлома в целом. Причем если рассматривать динамику сейсмичности, можно выделить участки месторождений как с постоянным проявлением сейсмических событий в течение многих лет, так и участки, на которых отмечается относительно кратковременное повышение уровня сейсмической активности зачастую при наличии дополнительных триггеров (например, повышение обводненности, взрывное воздействие). Кроме того выявлены участки, где длительное время практически не происходит сейсмических событий.

Выявлены кластеры в консольной части массива: на Кукисвумчоррском и Юкспорском месторождениях. Причем на Юкспорском месторождении происходило формирование обрушения с осыпанием горной массы в Саамский карьер

Большое число кластеров связано с проходкой горных выработок. Выявлена корреляция по времени проявления сейсмических событий и времени проведения взрывных работ при проходке выработок. Непосредственно в зоне разлома проходка выработок и пересечение разломной структуры, по-видимому, являлась триггером для активизации разлома, так как сейсмические события происходили не только на горизонте проводимых работ, но и выше. Дополнительным фактором активизации разлома являлся сезонный фактор и связанное с ним увеличение водопритоков: для части кластеров характерен более высокий уровень сейсмической активности в такие периоды.

Таким образом, применение представленного подхода позволило выявить возможные причины формирования кластеров сейсмособытий или групп кластеров, выявить как постоянно действующие, так и кратковременные триггерные факторы.

## Численное моделирование возможного механизма прерывистого скольжения берегов разлома под действием внешних сил

---

Немирович-Данченко М.М. (1, 2), Худорожко И.Н. (2)

(1) Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

(2) Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

e-mail: michnd@mail.ru

Рассмотрена возможная модель инициации разрывов в приразломной зоне под действием волн деформации. Расчет ведется в рамках модели упруго-хрупкой среды конечно-разностным методом. Обсуждается роль приходящих извне волн деформации, например, приливных волн, как триггерных механизмов. Рассмотрена область геосреды, содержащая разлом, под действием волн деформации. Берега разлома осложнены малоамплитудной прямоугольной ступенькой, препятствующей проскальзыванию берегов разлома под действием первоначально приложенных к ним касательных напряжений. Проскальзывание происходит в результате приложения некоторого нормального к плоскости трещины напряжения, играющего, совместно с касательными напряжениями, роль триггера. Предлагается следующий сценарий реакции среды на внешнее воздействие. Проходящая деформационная волна (например, от произошедшего поблизости землетрясения или взрыва, или волны приливного генезиса) раздвигает контактирующие поверхности берегов разлома. Наличие сдвигового усилия приводит в некоторый момент времени к тому, что берега после прохождения фазы растяжения остаются зацепленными на ступеньке. В этом случае в окрестностях вершины разлома и в окрестностях зацепа будут концентрироваться напряжения и, как следствие, будут накапливаться микрповреждения. Концентрация напряжений приводит к потере прочности, что приводит к росту разлома, то есть собственно к сейсмическому событию. Кроме того, часть энергии будет высвобождаться на разрушении зацепа. При численном моделировании вся среда, для которой проводится расчет, разбивается координатными плоскостями на расчетные ячейки. Задача решается в рамках модели упруго-хрупкой среды в лагранжевых переменных. Проведенный численный эксперимент описывает один из возможных сценариев внешнего триггерного воздействия на существующие разломы. Показано, что сейсмические волны при использовании такого подхода излучаются с задержками. Такой подход может быть использован как при решении задач сейсмического прогноза, так и при обработке результатов полевых наблюдений.

# Структурно-геологическая модель района водохранилищ Койна-Варна (Западная Индия)

---

**Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: malkinbv@atrus.ru

Интенсификация техногенной нагрузки, в частности, организация крупных водохранилищ, может приводить в тектонически активных регионах к изменению геодинамической обстановки, являясь триггером возникновения наведенной сейсмичности. Практическую значимость представляют исследования, проводимые в районе водохранилищ Койна и Варна, расположенных в западной части Деканского нагорья в районе Западных Гат, в пределах которых зарегистрированы сейсмические события с магнитудами от 3 до 6.3. Геологический разрез территории исследований характеризуется четко выраженным двурусным строением: архейские гнейсы перекрыты толщей базальтовых траппов, переслаивающихся с осадочно-эффузивными отложениями, мощностью 0.8-1.2 км.

Изучение территории с использованием методов дистанционного зондирования позволило составить общие схемы тектонических нарушений. На основе лидарной съемки сформирована подробная схема линеаментов, которые имеют преимущественно СЗ-ЮВ, СВ-ЮЗ и субмеридиональное направления. По результатам выполненных геолого-геофизических исследований были предложены уточненные структурно-геологические схемы района и определены сейсмогенные нарушения при сопоставлении зарегистрированных очагов землетрясений с этими схемами [Смирнов, Пономарев, 2020].

В докембрийском фундаменте выделены системы разломов субмеридионального направления и разломы СЗ-ЮВ простирания, характерные для Гондваны. Разломы СВ-ЮЗ направления являются активизированными и, вероятно, связаны с более поздними плитотектоническими движениями. Более молодые миоценовые субширотные разломы прослеживаются в трапповой толще. Региональное поле напряжений обусловлено движением Индо-Австралийской плиты в север-северо-восточном направлении, которое подтверждено данными GPS-наблюдений. Локальное поле напряжений обусловлено реакцией глубинных разломов района исследований на региональное поле напряжений и на техногенное влияние, вероятно, связанное с режимом эксплуатации водохранилищ.

Использование формализованного линеаментного анализа LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis - дешифрирование линеаментов и статистический анализ штрихов) и применение интерактивной интерпретации цифровых моделей рельефа и спутниковых снимков различного разрешения позволяет объективнее выделять системы разломов, определять зоны влияния дизъюнктивов, детализировать их внутреннее строение и устанавливать кинематический стиль. Небольшие линеаменты, выбранные с помощью технологии LESSA, используются для построения протяженных линеаментов, роз диаграмм малых линеаментов и полей плотности. Доминирующие направления линий вытянутости роз диаграмм группируются в компактные прямолинейные или плавно изогнутые структурные линии, которые интерпретируются как линеаментные зоны разной ширины и протяженности. Линеаменты с разными математическими критериями дешифрирования могут соответствовать разломам с разной иерархией и степенью неотектонической и гидрогеологической активности.

По данным формализованного анализа на региональной схеме структурных линий вытянутости линеаментов прослежена субмеридиональная сейсмогенная зона Койна с зоной динамического влияния шириной до 50 км. Вероятно, эта региональная структура является зоной локализации

деформаций и представляет собой геоморфологически выраженную ступенчатую переходную зону от Западных Гат к предгорной части равнины Канкан. Осевая зона сгущения структурных линий совпадает с субмеридиональными участками долин рек Койны и Варна. Протяженные линеаменты, выделенные по направлению СЗ-ЮВ, маркируют шир-зону Chitradurga в виде серии субпараллельных линеаментов, которая протягивается через юго-западную часть полуострова Индостан.

Результаты комплексного анализа результатов обработки космических снимков и цифровых моделей рельефа использованы для построения структурно-геологической модели района водохранилищ Койна-Варна. Схема пространственного распределения общей плотности малых линеаментов согласуется с ранее предложенной схемой развития палеорифтовой окраины Индийского континента согласно модели [Tucker and Slingerland, 1994], учитывающей изостатические эффекты при денудационной разгрузке рифтогенных краёв континентов.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 122032900172-5.

Литература

Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН. 2020. 412 с.

Tucker G.E., Slingerland R.L. Erosional dynamics, flexural isostasy, and long-lived escarpments: A numerical modeling study // JGR V. 99. Issue B6. 1994. P. 12229-12243.



# Новый подход для изучения квазитропических циклонов в Черном море

---

**Левина Г.В.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

e-mail: levina@cosmos.ru

Несколько лет назад ведущие зарубежные ученые предсказали, что в связи с изменением климата возможно более частое появление ураганоподобных квазитропических циклонов (КТЦ) в западной части Средиземного моря и в Черном море [1]. В российском метеорологическом сообществе на это не обратили должного внимания. Циклон такого типа уже появлялся в юго-западной части Черного моря в сентябре 2005 г. и был предметом изучения в ряде публикаций в российских журналах [2, 3]. Однако многие отечественные специалисты вообще об этом не знали, а из тех, кто знали, многие отнесли к этому циклону как к экзотическому случаю, который имеет ничтожную вероятность повторения. Ситуация резко изменилась летом 2021 г., когда в августе–октябре вблизи густонаселенных районов побережья Черного и Азовского морей возникло несколько ураганоподобных циклонов. Самый впечатляющий из них продемонстрировал свой «глаз» недалеко от Сочи 4 октября 2021 года. Эти вихри были идентифицированы как КТЦ зарубежными метеорологами из Европы, США и Австралии и обсуждались на всемирном интернет-форуме [tstorms.org](http://tstorms.org), в котором автора пригласили участвовать с 2012 года. При этом в российских прогнозах погоды на соответствующие дни были только предупреждения о сильном ветре и аномальных осадках, но сами явления не были идентифицированы как КТЦ.

Для диагностики КТЦ в Черном море предлагается применить подход, разработанный с участием автора в совместных российско-американских исследованиях. В основе подхода лежит фундаментальная физическая теория турбулентного вихревого динамо (ИКИ РАН). Он разработан для выполнения оперативной диагностики зарождения урагана в режиме реального времени с помощью атмосферного облачно-разрешающего численного моделирования и в сочетании с анализом соответствующих спутниковых снимков [4]. Недавние обсуждения на престижных международных форумах в 2021 г. (34-я конференция Американского метеорологического общества по ураганам и тропической метеорологии, Генеральная ассамблея Европейского геофизического союза и 4-я электронная конференция по атмосферным наукам – ECAS2021) показали, что предлагаемая диагностика может помочь метеослужбам в более раннем выявлении этих опасных штормов, чем происходит сейчас.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы «Мониторинг», № государственной регистрации 01.20.0.2.00164. Пост-обработка данных обсуждаемого облачно-разрешающего численного моделирования осуществлялась при частичной поддержке Национального научного фонда США по гранту АТМ-0733380.

Литература

1. Romero R. and Emanuel K. Climate change and hurricane-like extratropical cyclones: Projections for North Atlantic polar lows and medicanes based on CMIP5 models // *J. Climate*. 2017, 30, 279–299. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0255.1
2. Ефимов В.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А. Численное моделирование квазитропического циклона над Черным морем // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43. № 6. С.723–733.
3. Ефимов В.В., Станичный С.В., Шокуров М.В., Яровая Д.А. Наблюдение квазитропического циклона над Черным морем // *Метеорология и гидрология*. 2008. №. 4. С.53–62.

4. Levina G.V. Birth of a hurricane: early detection of large-scale vortex instability // J. Phys.: Conf. Ser. 2020, 1640, 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1640/1/012023>

# Сейсмогенерирующая роль избыточной массы геологической среды на примерах природных и техногенных землетрясений в Центральной Азии

---

**Великанов А.Е.**

Филиал «Институт геофизических исследований» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

e-mail: aevelikanov@mail.ru

В Казахстанском национальном центре данных (KNDC) Института геофизических исследований в процессе проводимых уже более 10 лет научно-исследовательских работ используются в числе других и гравиметрические данные. При анализе сейсмичности территории Казахстана и прилегающих районов Центральной Азии была замечена приуроченность многих эпицентров ощутимых умеренных и сильных землетрясений тектонического характера, а также локализованных скоплений эпицентров слабых и очень слабых землетрясений к локальным аномалиям и аномальным зонам силы тяжести, совпадающим с избыточными массами геологической среды.

Избыточная масса геологической среды может быть представлена как локальными объёмами пород повышенной плотности в любой местности, так и объёмами пород различной плотности, локализованными в положительных формах рельефа, т.е. в различных возвышениях и горной местности. Избыточная масса геологической среды также может быть представлена изменяемыми объёмами больших водоёмов как крупных озёр в межгорных впадинах (Зайсан, Алаколь), так и крупных водохранилищ (Капчагайское, Шульбинское и другие).

При добыче углеводородов на крупных нефтяных и газовых месторождениях изменяется масса нефтегазоносных геологических структур. Возникает дефект массы геологической среды, ведущий к дестабилизации недр на больших глубинах в породах кристаллического фундамента. Примерами объектов интенсивной добычи углеводородов в Центральной Азии, на которых происходили ощутимые и разрушительные техногенные землетрясения, являются Газлинское месторождение в Узбекистане и месторождения в районе Северного Прикаспия.

Изменяемая избыточная масса геологической среды возникает также при открытой добыче твёрдых полезных ископаемых на крупных угольных разрезах (Молодёжный, Богатырь, Каражира) и крупных рудных месторождениях (близ г. Рудный, Жезказганское и другие). Здесь она связана с созданием громадных объёмов породных отвалов рыхлых пород как внешних, так и внутренних. Особенно чувствительно сейсмогенерирующие процессы протекают при быстром накоплении внутренних отвалов пород, так как легче и быстрее возить рыхлые пустые породы во внутрь карьера, чем на удалённые внешние отвалы.

В данной работе приводятся конкретные примеры известных природных и техногенных землетрясений в Центральной Азии, в которых прослеживается гравитационная связь сейсмичности с избыточными массами геологической среды. При этом техногенные землетрясения часто связаны с избыточными массами относительно быстро или периодически изменяемой геологической среды. Все они тектонического характера, так как реализуются по существующим тектоническим разломам.

# Математическое моделирование возмущения квазистационарного электрического поля в среднеширотной ионосфере над грозovým облаком

---

Нестеров С.А., Денисенко В.В.

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

e-mail: Twist3r0k@yandex.ru

Создана квазистационарная трехмерная модель электрических полей и токов в проводнике, включающем грозвое облако с окружающей его атмосферой, а также землю

и ионосферу. Облако моделируется как эллипсоид с горизонтальными осями 40 км и 80 км и вертикальной осью 10 км с центром на высоте 10 км. Вертикальный сторонний ток, заданный внутри облака, является генератором, который создает напряжение около 40 МВ между нижней и верхней границами облака. Пространственное распределение компонент тензора проводимости вычисляется с помощью эмпирических моделей (Denisenko et al., 2019). Задача электропроводности решается численно с использованием метода декомпозиции области на две перекрывающиеся подобласти. В первой, ниже 50 км, решение упрощается за счет скалярного вида проводимости (Denisenko, Pomozov, 2010). Во второй, выше 20 км, из-за независимости тензора проводимости от горизонтальных координат можно использовать преобразование Фурье (Nesterov, Denisenko, 2021).

Полученные электрические поля и токи ниже 60 км почти не зависят от наклона геомагнитного поля. Выше 80 км ток течет практически вдоль магнитных силовых линий, поскольку продольная проводимость намного больше проводимости в поперечных направлениях. Около 3/4 полного стороннего тока замыкается током проводимости ниже 50 км внутри и вблизи облака. Остальной ток достигает ионосферы, где он распределяется по всему земному шару, стекает на землю через всю атмосферу и возвращается под облако по земле. Этот контур тока - вклад грозвого облака в глобальную электрическую цепь. Ионосферная часть этого тока обеспечивается электрическим полем, напряженность которого несколько мкВ/м в ночной ионосфере и еще на два порядка меньше в дневных условиях. Это поле практически невозможно обнаружить на фоне на три порядка более сильных полей, всегда существующих в ионосфере.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00006, <https://rscf.ru/project/22-27-00006/>

## Литература:

Денисенко В.В., Помозов Е.В. (2010). Расчет глобальных электрических полей в земной атмосфере. Вычислительные технологии. 15(5), 34-50.

Denisenko, V.V., M. J. Rycroft and R. G. Harrison (2019). Mathematical Simulation of the Ionospheric Electric Field as a Part of the Global Electric Circuit, *Surv. Geophys.*, 40(1), 1-35.

Nesterov, S.A., Denisenko, V.V. (2021). The influence of the magnetic field on the quasistationary electric field penetration from the ground to the ionosphere. *Journal of Physics: Conference Series* 1715. Paper 012020. 1-10.

## Прогноз устойчивости оползневых склонов в местах эксплуатации промышленных объектов

---

Гордеев В.Ф., Малышков С.Ю., Поливач В.И.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

e-mail: gordeev\_vasily\_tomsk@mail.ru

При разработке концепции оценки устойчивости оползневых склонов по параметрам естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) исследования проводились на реальных объектах «Газпромтрансгаз-Махачкала». Работы выполнялись на оползневых участках магистрального газопровода «Моздок-Казимагомед» (600-610км) и газопроводных отводах «Ботлих» 95 км (район ГРС Зило) и 57,7 км (населенный пункт Аргвани), с целью создания пунктов наблюдения за геодинамикой грунтов по параметрам ЕИЭМПЗ. Для решения поставленных задач был выполнен комплекс работ включающий:

- предполетное, полетное и камеральное дешифрирование космоснимков, с целью выделения участков и зон проявления современных активных оползневых процессов;
- трещинно-морфологическую съёмку оползней и прилегающих склонов с выделением оползневых трещин растяжения, растяжения и сдвига, спущенных ступеней трещин растяжения и сдвига, трещин сжатия и валов выдавливания, свидетельствующих о развитии оползневых процессов;
- картирования аномальных зон в пространственных вариациях ЕИЭМПЗ, отождествленных с активизацией геодинамических процессов в литосфере.

В качестве базовых инструментальных средств использовались многоканальные геофизические регистраторы «МГР-02-16», которые позволяют анализировать как временные, так пространственные вариации интенсивности ЕИЭМПЗ, характеризующие геодинамику литосферы. При площадных измерениях использовался GPS навигатор, для позиционирования пикетов на местности. При обработке результатов измерений использовалось оригинальное программное обеспечение («PoleAnalyzeV3.exe»; «MGR\_AnalyzeV10.exe») и стандартные пакеты: «Microsoft Excel»; «Surfer 8»; «OzExplorer»; «Origin Pro7».

Принцип выделения пространственных аномалий интенсивности ЕИЭМПЗ заключается в том, что один регистратор используется как вариационный (реперный), который расположен вне зоны активного оползня, а вторым регистратором проводят маршрутные измерения, пересекая оползневой участок. Аномальное поле рассчитывается, как отношение интенсивности пространственно-временных вариаций ЕИЭМПЗ, зарегистрированных маршрутным регистратором к интенсивности временных вариаций зарегистрированных реперным регистратором. В случае, если это отношение положительное, дается заключение, что на данном участке работ преобладают напряжения растяжения, в противном случае – напряжения сжатия. Чем больше отличие отношения от 1, тем выше вероятность экзогенных геодинамических проявлений.

На исследованном участке МГ «Моздок-Казимагомед» отчетливо просматривается три области с напряжениями растяжения:

1. в районе 605,9 км;
2. в районе 607,0 км;
3. в районе провала 607,5 км.

Зон сжатия не зафиксировано на протяжении всего маршрута на этом участке, что подтверждается геоморфологическими исследованиями.

Более сложное геодинамическое состояние горной среды было выявлено на втором объекте исследований. Результаты обработки сигналов ЕИЭМПЗ, в районе ГРС Зило, позволяют с большой долей вероятности поделить весь участок на три зоны активной геодинамики. Северная часть

подвержена напряжениям сжатия, центральная область находится в зоне слабых напряжений растяжения, а южная подвержена активной геодинамике с напряжениями растяжения.

Результаты инструментального мониторинга НДС гонных пород в районе населенного пункта Аргвани (57,7 км) геоморфологических исследований хорошо совпадают с результатами картирования аномальных зон ЕИЭМПЗ.

Результаты инженерно-геологической и трещинно-морфологической съёмок оползней и прилегающих склонов хорошо совпадают с результатами картирования аномальных зон ЕИЭМПЗ, свидетельствующих о развитии оползневых процессов.

Проведенные работы показали высокую перспективность метода ЕИЭМПЗ для инструментального картирования опасных геологических процессов. Причем, метод позволяет фиксировать начальные стадии активизации экзогенных процессов, когда геодинамика еще не нашла отражение в современном рельефе. Исследования показали правильность предложенной концепции оценки рисков геодинамических проявлений и минимизации их последствий.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, проект №121031300155-8.

## Постсейсмические эффекты массовых взрывов, зарегистрированные при разработке железорудных месторождений КМА

---

Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Батухтин И.В.,  
Петухова С.М.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: emgorbunova@bk.ru

Эксплуатация месторождений твердых полезных ископаемых сопровождается большим объемом дренажных работ, направленных на уменьшение водопритоков в горные выработки и карьеры. Интенсивный водоотбор приводит к формированию локальных и региональных депрессионных воронок в разновозрастных водоносных горизонтах. В свою очередь нарушение гидрогеодинамической обстановки характеризуется изменением скорости, направления и уклонов подземного потока и может приводить к негативным последствиям, выраженным в активизации экзогенных (карстово-суффозионных, оползневых) и природно-техногенных процессов.

Для оценки геодинамической и геоэкологической безопасности разработки месторождений особую значимость приобретают исследования, связанные с изучением влияния массовых взрывов на фильтрационные свойства водонасыщенного коллектора. Переход на новый уровень научно-методического сопровождения горнопроходческих работ с использованием высокоточных датчиков, установленных в наблюдательных скважинах и работающих в широком диапазоне частот, обеспечивают мониторинг техногенно-нарушенного режима подземных вод. С июля 2019 г. в пределах железорудных месторождений Курской магнитной аномалии (КМА), расположенных на юго-востоке г. Губкин Белгородской области и разрабатываемых с использованием взрывных технологий, выполняются наблюдения за реакцией системы «пласт-скважина». Наряду с косейсмическими гидрогеологическими откликами на прохождение сейсмических волн от массовых взрывов, проводимых в шахте и карьере, прослежены постсейсмические эффекты двух видов.

Первый вид представлен увеличением давления в системе «пласт-скважина» на 0.1–0.5 кПа, которое, вероятно, свидетельствует о локальном изменении фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора и может быть связан с проявлением скин-эффекта из-за кольматации трещин в околоскважинном пространстве. К второму типу относится снижение уровня надрудного водоносного горизонта от 15 мм до 86 мм в течение первых суток после взрывов, произведенных вблизи пункта наблюдений. Относительно высокий градиент снижения уровня подземных вод по сравнению с фоновыми вариациями, отфильтрованными от влияния атмосферного давления, отмечен в ближней зоне массовых взрывов и связан, возможно, с заполнением зон техногенной (наведенной) трещиноватости. Подобный эффект перетоков был отмечен между отработанными камерами, которые использовались под захоронение отходов производства - пастообразной пульпы. При проведении взрывов в камерах, наиболее близко расположенных к участку закачки, было прослежено уменьшение напора жидкости в заполняемой камере, напротив, в нижерасположенной камере установлен подъем уровня.

Результаты проведения повторных откачек и геофизических исследований в скважинах, расположенных в пределах разрабатываемых железорудных месторождений, свидетельствуют о неоднозначном изменении фильтрационных свойств водонасыщенных коллекторов под влиянием массовых взрывов, произведенных за 2.3 года измерений. По графикам прослеживания восстановления уровня после откачек водопроницаемость сланцев надрудной обводненной толще уменьшилась от 7.7 до 5.5 м<sup>2</sup>/сут, кварцитов - увеличилась от 1.4 до 1.7 м<sup>2</sup>/сут. Отмечен общий тренд снижения уровня и уменьшения напора на 0.8-1.6 м. По данным резистивиметрии в надрудном водоносном

горизонте прослежено смещение интервалов водопритоков и изменение их интенсивности, которые подтверждаются другими видами геофизических исследований в скважинах - кавернометрией и телеметрией.

По результатам обработки данных синхронной регистрации сейсмических сигналов и гидро-геологических откликов на проведение массовых взрывов определены нижний и верхний пороги динамического деформирования водонасыщенного коллектора. Нижний порог косейсмических вариаций давления в системе «пласт-скважина» соответствует скорости смещения от 0.1 мм/с на приведенных расстояниях до  $360 \text{ м/кг}^{(1/3)}$ . Постсейсмические эффекты прослежены при скорости смещения грунта более 8.4 мм/с на приведенных расстояниях менее  $69 \text{ м/кг}^{(1/3)}$ . Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для разработки методики прогнозной оценки реакции системы «пласт-скважина» на сейсмическое воздействие, которая позволит минимизировать риски возможных аварий в процессе эксплуатации месторождений твердых полезных ископаемых.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 122032900172-5.



## Исследование условий прохождения аврорального хисса от источника к земной поверхности

---

Никитенко А.С. (1), Федоренко Ю.В. (1), Бекетова Е.Б. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

(2) Филиал Мурманского арктического госуниверситета в г. Апатиты, Апатиты, Россия

e-mail: alex.nikitenko91@gmail.com

Авроральный хисс — один из типов излучений моды вистлеров, регистрируемых у земной поверхности в высоких широтах. Его спектр имеет максимум на частотах 8-10 кГц.

Авроральный хисс возникает на высотах 5-20 тыс. км в ходе черенковского излучения высыпаящихся электронов. Генерируемые волны набирают энергию в результате развития резонанса Ландау.

Волновые нормали генерируемых волн лежат вблизи резонансного конуса, который близок к 90 градусам по отношению к внешнему магнитному полю. Поскольку в таких волнах доминирует электрическое поле, их принято называть электростатическими.

Считается, что генерируемые электростатические волны не способны достичь земной поверхности из-за отражения на высотах 3-5 тыс. км, где частота волны становится равной локальной частоте нижнегибридного резонанса. Преодоление отражения происходит за счет рассеяния волн на неоднородностях электронной концентрации с масштабами много меньше длины волны ( $< 100$  м). Рассеянные волны имеют широкий пространственный спектр. Часть волн из этого спектра лежат в конусе прохождения. Они способны преодолеть полное внутреннее отражение в нижней ионосфере и выйти к Земле.

Последние исследования показывают, что на земной поверхности излучениями типа авроральный хисс засвечивается область пространства, размеры которой составляют от нескольких сотен километров вплоть до тысячи километров. В силу геометрического расхождения малые размеры засвеченной области не могут быть объяснены рассеянием электростатических волн на высотах 3-5 тыс. км. Мы исследовали условия прохождения электростатических волн к земной поверхности и особенности распространения, обуславливающие наблюдаемые малые размеры засвеченной области.

## Оценка влияния контактных характеристик на напряженно-деформированное состояние моделируемого нарушенного массива

Дмитриев С.В., Семенова И.Э.

Федеральный исследовательский центр Кольский научный центр Российской академии наук, Апатиты, Россия

e-mail: s.dmitriev@ksc.ru

Одним из важных геологических факторов, оказывающих влияние на напряженно-деформированное состояние разрабатываемых месторождений, являются структурные неоднородности различных порядков, что требует их адекватного учета при прогнозе геомеханических условий в процессе отработки запасов полезных ископаемых.

В конечно-элементных моделях крупные разломные структуры могут имитироваться путем их заполнения композитным замещающим материалом со сниженными прочностными (деформационными) характеристиками. Такое представление дает достаточную достоверность моделирования на уровне модели месторождения. При более детальном моделировании, например изучении отдельного блока месторождения, необходимо также учитывать контактные характеристики на границе блоков.

Учет влияния межблоковых интерфейсов в методе конечных элементов возможен с использованием предложенных Р.Гудманом контактных элементов и их модификаций. Данные элементы характеризуются нормальной и тангенциально жесткостью. Целью представленных численных экспериментов было оценить изменение поля напряжений вмещающего массива и самой разломной структуры при внедрении контактных элементов по границе структурной неоднородности.

В качестве исходного напряженно-деформированного состояния были приняты результаты моделирования НДС блока месторождения Кукисвумчорр с характерным вертикальным разломом, секущим рудную залежь. Месторождение находится в тектонически напряженном Хибинском массиве. Поэтому максимальная компонента главных напряжений имеет субгоризонтальное направление и действует в около-нормальном режиме к плоскости разлома. Разломная структура и вмещающий массив характеризовались следующими деформационными параметрами:

- Вмещающий массив:  $E = 70000$  МПа и  $\nu = 0.2$
- Рудное тело:  $E = 40000$  МПа и  $\nu = 0.35$
- Разломная структура:  $E=7000$ МПа и  $\nu = 0.3$

В качестве начальных нормальной и тангенциальной жесткости были приняты приближенные значения 2000 МПа/м и 1000 МПа/м соответственно [1]. Всего было просчитано двенадцать вариантов модели с вариацией контактных жесткостей и деформационных характеристик блоков в пределах диапазона ( $2 \cdot 10^4 \div 7 \cdot 10^6$  МПа/м). Анализ результатов позволил сделать следующие выводы:

- В случае, когда заполняющий материал разломной структуры близок по свойствам к вмещающему массиву, внедрение контактных элементов по её поверхности оказывает больший эффект на поле напряжений в самом массиве.

- При внедрении контактных элементов по поверхности разломной структуры, представленной более ослабленными породами, ранжирование нормальной и тангенциальной жесткости (даже в пределах двух порядков) не оказывает особого эффекта на поле НДС вмещающего массива.

- Значения максимальной компоненты в самой разломной структуре, при внедрении контактных элементов по её поверхности, подвергаются более существенным изменениям. Данный эффект становится менее заметным, при снижении прочностных характеристик разломной структуры.

Планируется продолжение численных экспериментов при другой ориентировке максимального сжатия по отношению к разломной структуре.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта РНФ № 22-17-00248, а также программы НИР № 0186-2022-0005

1. Костюченко В.Н., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В. Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба // Физ. мезомех. - 2002. - Т. 5. - № 5. - С. 23-42

## Регистрация землетрясений в 2013 и 2020 годах в Ханты-Мансийской нефтегазоносной провинции

---

Габсатарова И.П.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук Обнинск, Россия

e-mail: ira@gsras.ru

В Ханты-Мансийской нефтегазоносной провинции в 80-х годах открыто Приобское нефтяное месторождение, одно из крупнейших по площади, но обладающее низкопроницаемыми коллекторами. Для повышения уровня добычи нефти в этом районе, начиная с 2006 г. проводятся мощные ГРП (гидроразрыв пласта). Массовое проведение гидроразрыва пласта – ключевая технология разработки южной части Приобского месторождения [Колупаев и др., 2019]. До 2012 г. включительно наблюдался рост числа проводимых ежегодно числа ГРП, достигающие несколько сотен в год. После этого при падении числа первичных ГРП наблюдался значительный рост вторичных ГРП. Эффективности применения этих методов для увеличения добычи нефти посвящено немало специализированных статей.

Разработка месторождений всегда сопровождается техногенным сейсмическим шумом, микросейсмическими событиями, энергия возникающих сейсмических событий зависит от свойств пород коллектора и окружающего горного массива, их напряженного состояния, от степени дискретности среды и наличия в ней неоднородностей. По различным данным насчитывается более 50 случаев, когда разработка месторождений углеводородов привела к ощутимому изменению сейсмического режима района работ. Эти данные обобщены в некую зависимость времени появления сейсмичности от времени начала разработки и от времени начала закачки жидкости до появления сейсмичности и до возникновения максимального землетрясения. Оказалось, что со времени начала закачки жидкости при высоком давлении, проходит примерно 5–10 лет до начала появления заметной сейсмичности и примерно 10–15 лет до максимального землетрясения [Адушкин, Турунтаев, 2015].

Район Приобского месторождения всегда относился к асейсмичным территориям и поэтому здесь не развивалась сеть сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН. Возможности регистрации сейсмических событий региональными сетями станций в окрестности месторождения оценены в ряде работ и составляют: для Уральской сети примерно  $M_L=3.0-3.2$  в [Маловичко и др., 2020], Алтае-Саянской региональной сети примерно такого же уровня [Еманов и др., 2020]. Для более уверенного определения параметров землетрясений в районе Приобского месторождения привлекаются данные сети IMS СТВТО, состоящей из высокочувствительных сейсмических групп.

21 февраля 2020 г. в 20h58m с  $M=3.5$  в 30 км к северо-востоку от г. Ханты-Мансийска, было зарегистрировано сейсмическое событие всеми сейсмическими станциями Уральского региона, многими станциями Алтае-Саянской сети, станциями ФИЦ ЕГС РАН на ВЕП и п-ове Ямал, станцией «Тикси» в Якутии, а также отдельными станциями Казахстанской сети ИГИ НЯЦ РК, что позволило получить хорошее окружение эпицентра и уточнить параметры гипоцентра, первоначально полученные по ограниченной сети MIRAS на Урале. Известно, что близко к этому очагу 22.03.2013 г. было зарегистрировано землетрясение сопоставимой магнитуды. Проведены работы по уточнению магнитуды явлений. Предполагается, что рассматриваемые землетрясения, произошедшие несколько западнее центра обширной территории Приобского месторождения, скорее всего, имеют индуцированную природу. Они произошли через 7 и 14 лет после первого мощного ГРП на этом месторождении. Возможности сети в этом районе не позволяют регистрировать более слабую сейсмичность.

## Анализ расположения кратеров для недавно образовавшихся кратерных кластеров на Марсе

---

Подобная Е.Д., Попова О.П., Глазачев Д.О.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: epodobnaya@gmail.com

За последние годы на Марсе было обнаружено около 700 недавно образованных мест падения метеороидов, образовавших одиночные кратеры и кратерные поля с размерами отдельных кратеров до 50 м. Благодаря более разреженной (по сравнению с Землей) атмосфере Марса, падающие метеороиды меньше разрушаются. Примерно половина из них фрагментирует в атмосфере Марса и образует кратерные поля (кластеры). На Земле, как правило, метеороиды наблюдаются во время недолгого пролета через атмосферу, в редких случаях находятся их фрагменты. Исследование кратеров на Марсе дает уникальную возможность изучать детали фрагментации, неопределимые на Земле.

Рассматриваются эллипсы рассеяния для 55 кластеров, содержащих более 5 кратеров, построенные различными методами для кратерных кластеров на Марсе. По ним находились азимут пролета метеороида и угол его входа в атмосферу, размер эллипса содержит информацию о фрагментации. Полученные результаты показывают хорошее соответствие ранее опубликованным независимым оценкам.

При косых ударах выброс из кратера распределяется несимметрично и позволяет определить направление полета. Для рассматриваемых метеороидов распределение выбросов и соответствующий азимут находились по изображениям кратеров на Марсе, полученным камерами HiRISE. Для 42 рассматриваемых кластеров азимут пролета метеороидов сравнивался с азимутами, полученными по эллипсам рассеяния. Для азимутов, рассчитанных по выбросам кратеров, наклон проекции траектории метеороида соответствует независимым оценкам примерно для 70% кластеров, направление полета согласуется примерно в трети случаев. Различие оценок азимутов, полученных разными способами, показывает необходимость иных подходов.

Предварительные результаты математического моделирования показывают, что развиваемая модель фрагментации позволит описать кластеры и предложить методы определения направления полета и свойств ударника.

## Циклически-индуцированные деформации разломных зон

---

**Кузьмин Ю.О.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук; Москва, Россия

e-mail: kuzmin@ifz.ru

Представлены примеры циклически-индуцированных деформаций разломных зон и механизмы их формирования. Рассмотрены три типа воздействия на разломную зону: техногенное, экзогенное и эндогенное. Техногенное воздействие демонстрируется на примере эксплуатации подземного хранилища газа и месторождения сверхвязкой нефти. Природное (экзогенное и эндогенное) воздействие вызвано циклическим режимом изменения атмосферных осадков и аномальными приливными деформациями в зоне разлома.

Циклически-индуцированные деформации, как явление, могут происходить в виде двух форм проявления причинно-следственных связей между различными процессами. В первом случае – это вынуждение, аналогично происхождению вынужденных колебаний. Во втором случае – это наведенные процессы, когда выведение из равновесия механических систем осуществляются малыми, иногда «не очевидными» воздействиями.

Предложен механизм формирования этих аномальных деформаций на основе моделей пороупругого включения и пороупругой неоднородности. Показано, что первая модель соответствует вынужденным циклическим деформациям, а вторая циклически-индуцированным. Решена задача о смещениях поверхности упругого полупространства, содержащего пороупругую область в форме вертикальной, протяженной прямоугольной призмы, которая является модельным аналогом активного фрагмента разломной зоны. Получены аналитические формулы для оценки смещений земной поверхности для двух вариантов пороупругих моделей: включения и неоднородности.

На примере Ашхабадского разлома проведено сравнение обеих моделей и показано, что механизм формирования аномальных деформаций основанный на модели пороупругой неоднородности намного лучше описывает наблюдаемые смещения, чем модель пороупругого включения. Анализ аномальных смещений земной поверхности на подземном хранилище газа показал, что локальные оседания происходят, как в период отбора газа, так и во время закачки. Установлено, что в первом случае циклические оседания формируются по модели пороупругого включения, а во втором по модели пороупругой неоднородности. Локальные оседания в зоне разлома в период отбора газа линейно связаны с изменением пластового давления. Формирование аномальных просадок во время закачки газа нелинейно связаны с изменением пластового давления. Это является ярким примером циклически-индуцированных деформаций разломных зон, когда вариации во времени пороупругих параметров внутри разломной зоны в обстановке внешних квазистатических нагрузок, формируют локальное возмущение напряженно-деформированного состояния в окрестности разлома.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН.

# Триггерные связи в геологической среде в процессе природной и антропогенной дегазации Земли

---

**Богоявленский В.И., Богоявленский И.В.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: Geo.ecology17@gmail.com

Более десяти лет в ИПНГ РАН проводятся комплексные исследования различных опасных процессов, угрожающих освоению месторождений углеводородов и других полезных ископаемых, как на суше, так и на акваториях Мирового океана. Многие из них нередко имеют прямые или косвенные причинно-следственные связи (землетрясения, стратовулканы, грязевые вулканы, сипы газа и нефти, мощные выбросы газа, диссоциация газогидратов, проседания поверхности земли, оползни, цунами, аварии и катастрофы при добыче и транспортировке УВ и др.). В частности, землетрясения являются триггерами для извержений вулканов, оползней, выбросов газа и образования цунами, которые в свою очередь сами инициируют сейсмические события. Возможно построение множества различных цепочек триггерных процессов, приводящих к значительным, в том числе катастрофическим изменениям геологической среды. Проникновение человека в глубины геологической среды посредством строительства скважин, шахтных стволов и других подземных сооружений (подземные горные выработки) нередко приводит к аварийным и катастрофическим ситуациям, многие из которых обусловлены аномально высокими пластовыми давлениями (АВПД) в газонасыщенных отложениях. Авторами выявлены общие закономерности возникновения чрезвычайных ситуаций, связанные с высоким газонасыщением осадочной толщи и аварийными выбросами газа. Отмечено, что приближение подземных горных выработок с недостаточным внутренним давлением по отношению к пластовым давлениям (особенно шахт с давлением близким к атмосферному) провоцирует выбросы и взрывы газа, ликвидация которых может длиться годами. Само понятие АВПД имеет относительный характер и правильнее говорить о коэффициенте аномальности, отображающем разницу давлений в пласте и забое горной выработки. При этом можно говорить о возникновении локальных сверхвысоких (сверхгеостатических) давлений (СВД), которые по своей сути являются триггерами, приводящими к выбросам бурового инструмента и горным ударам в шахтах, сопровождаемых сейсмическими событиями. Авторами исследованы результаты разработки ряда месторождений углеводородов (Wilmington в США, Groningen в Нидерландах и др.), на которых извлечение углеводородов сопровождалось сильными проседаниями поверхности земли, землетрясениями, повреждениями стволов скважин, формированиями техногенных залежей и другими опасными процессами. Исследованы явления мощных природных и техногенных выбросов газа с формированием гигантских кратеров в криолитозоне Арктики и обоснованы механизмы формирования газонасыщенных полостей, в том числе за счет термокарстовых процессов и газодинамических разрывов пласта при СВД. Показано, что газодинамические процессы с СВД приводят к росту многолетних бугров пучения и катастрофическим выбросам, самовоспламенениям и взрывам газа на поверхности земли и воды термокарстовых озер, рек и морей, в том числе с деструкцией толстых пластов подземного льда и ледовых покровов акваторий.

## Критическое замедление в живой природе

---

Сергеев В.Н.

Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР  
имени академика М.А. Садовского Российской Академии Наук, Москва, Россия  
e-mail: victnsergeev@gmail.com

Для систем имеющим состояние неустойчивого равновесия характерно явление критического замедления. Критическое замедление при приближении к неустойчивому равновесию (катастрофе) – это явление имеющее универсальный характер [1–3], присущее разнообразным по природе системам, эволюционирующим к катастрофическому изменению их состояния. Суть этого явления заключается в том, что по мере приближения системы к катастрофе в ней (за счет случайных воздействий, всегда присутствующих в реальной системе) возбуждаются собственные колебания определяющих параметров с уменьшающейся с приближением к катастрофическому порогу частотой. В математической теории катастроф [4] «критическое замедление» называется одним из «флагов» катастрофы, т.е. событием ей предшествующим. Критическое замедление определяет и другие особенности поведения систем в окрестности критического перехода – увеличение автокорреляции и дисперсии случайных колебаний системы [5].

Эволюция живой природы является одним из примеров процессов, которым может быть присуще критическое замедление. Согласно гипотезы прерывистой эволюции последовательное развитие живых систем в какой-то момент может сменятся резкими изменениями [6]. При этом причинами такого поведения могут являться не только изменения среды обитания, но и причины биотического характера связанные с неблагоприятными мутациями живых организмов. Как показали результаты исследования опубликованного в [7] за 10 млн лет до катастрофического события, как считается, приведшего к гибели не птичьих динозавров они уже испытывали проблемы с образованием новых видов. Кроме того, как показано в настоящей работе, в динамике числа видов представленных в [7] присутствует критическое замедление. Это свидетельствует о приближении популяции к катастрофе и столкновение с Землей астероида 66 млн лет было лишь триггером вымирания не птичьих динозавров.

1. Дубровский В.А., Сергеев В.Н. Универсальный предвестник геомеханических катастроф // Докл. РАН. 2004. Т. 395. № 4. С. 479–481.
2. Scheffer M., et al. Anticipating critical transitions // Science. 2012. V. 338. P. 344–348.
3. Руманов Э. Н. Критические явления вдали от равновесия // УФН. 2013. Т. 183. № 1. С. 103–112.
4. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. Т.1. М: Мир. 1984. 350 с.
5. Scheffer M., et al. Early-warning signals for critical transitions // Nature. 2009. V. 461. P. 53–59.
6. Хлебодарова Т.М., Лихошвай В.А. Причины глобальных вымираний в истории жизни: факты и гипотезы // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2020. 24(4). С. 407–419.
7. Condamine F. L., et al. Dinosaur biodiversity declined well before the asteroid impact, influenced by ecological and environmental pressures // Nature Communications. 2021. 12:3833.



# Распространение КНЧ волн от виртуальных ионосферных источников, формируемых стендом СУРА

---

Котик Д.С., Яшнов В.А.

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

e-mail: dmitry.kotik@nirfi.unn.ru

Известно, что в области ионосферы, ограниченной снизу проводящим гиротропным E-слоем ионосферы (высота 120 км) и сверху областью быстрого уменьшения концентрации ионосферной плазмы, возможно волноводное распространение вдоль поверхности Земли быстрой магнитозвуковой волны (БМЗ). Указанную область можно рассматривать как волновод, в котором могут распространяться не только быстрые магнитозвуковые, но и альвеновские волны.

Для анализа характера распространения УНЧ-волн в ионосферном волноводе от ионосферного источника использовался лучевой метод (см. Котик Д.С., и др., Распространение крайне низкочастотного излучения от искусственного ионосферного источника в трёхмерном неоднородном магнитогидродинамическом волноводе // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 1. С. 1–11). При расчетах лучевых траекторий использовались международные модели ионосферы (IRI-2016), атмосферы (MSIS-E-90) и геомагнитного поля (DGRF/IGRF). Расчёты проведены для среднеширотной ионосферы. Для определённости была выбрана точка с географическими координатами стенда СУРА (56° с.ш. и 46° в.д.). Приводятся два семейства трехмерных лучевых траекторий на частоте  $f = 10$  Гц. Одна для источника в E-слое для дневных условий. Вторая для источника в максимуме F-слоя для ночных условий. Представляет интерес анализ возможности выхода излучения ионосферного источника к поверхности Земли, поэтому основное внимание уделялось выходу траекторий к высотам нижней ионосферы. На этих высотах лучевое приближение неприменимо, и расчеты выхода излучения к земной поверхности необходимо проводить на основе волнового подхода. Однако, в этих точках наиболее вероятно наблюдение сигнала на поверхности Земли. Результаты подобного рода расчетов нужно учитывать при выборе места расположения приемного пункта при планировании экспериментов по исследованию характеристик искусственных КНЧ сигналов, генерируемых в ионосфере стендом СУРА.

# Применение сверточной нейросети на основе вейвлет-разложения (wavelet-scattering) для анализа микросейсмических сигналов

---

**Абзалилов И.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: abzalilov.ia@phystech.edu

Микросейсмический мониторинг позволяет отследить множество процессов, происходящих в районах с естественной и индуцированной сейсмичностью. Системы мониторинга производят сбор и дальнейший анализ данных. Появление и активное развитие методов машинного обучения позволяет применить их к обработке микросейсмических данных, чтобы упростить ее и ускорить. Это особенно актуально ввиду все большего объема данных, которые поступают с объектов мониторинга.

Методология обработки и анализа сейсмического сигнала с точки зрения машинного обучения не уникальна и является общей для нескольких типов сигнала. Она включает в себя преобразование сигнала в частотно-временное изображение (спектрограмму) при помощи преобразования Фурье с дальнейшим применением нейронной сети. Нейронная сеть, как правило, представляет из себя последовательность из сверточных, рекуррентных и полносвязных слоев. Подобный подход демонстрирует свою эффективность относительно большого числа задач сейсмологии: выделение сигнала относительно шума, выделение первых вступлений S и P волн, локация источника сейсмического события и его характеристик.

В настоящей работе применен альтернативный подход к решению подобных задач. Он заключается в замене сверточных слоев фильтрами на основе вейвлет-преобразования. Таким образом, появляется возможность сократить число обучаемых параметров, а также обобщить методологию для обработки и анализа микросейсмических сигналов путем выбора оптимальных наборов вейвлет-преобразований. В пользу выбора вейвлет-преобразования говорит то, что преобразование производится в частотном и во временном диапазоне одновременно, чего нет при преобразовании Фурье. Плюсом вейвлет-разложения является инвариантность относительно деформаций.

В ходе работы решалась задача выделения сигнала и первого вступления. Для анализа были использованы волновые формы из глобального набора сейсмических данных Стэнфордского университета. В дальнейшем предполагается адаптировать полученные результаты к задаче анализа типа источника сейсмического сигнала.

# Особенности распространения радиосигналов в диапазоне ОНЧ во время высыпаний высокоэнергитических протонов в области высоких широт

Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б.,  
Суворова З.В., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Полярный геофизический институт Апатиты, Россия

e-mail: akhmetov@pgia.ru.com

Вторжение солнечных протонов в магнитосферу Земли и дальнейшее их высыпание в ионосферу вызывает повышение общей концентрации электронов в F, E, D областях ионосферы, что приводит к изменению вида вертикального профиля проводимости. Такие события разделяют по интенсивности потока вторгнувшихся протонов. Самые сильные называют GLE (Ground Level Enhancement) - в этом случае поток протонов регистрируется на уровне поверхности Земли. Такие события достаточно редки и до настоящего времени зарегистрировано 72 события. Более слабые – SPE (Solar Particle Event) случаются гораздо чаще в связи с чем не имеют порядкового номера. Такие события оказывают значительное влияние на распространение радиосигналов в волноводе Земля – ионосфера, а потому нуждаются в изучении. С точки зрения задач навигации, локации и связи необходимо оценить влияние вторжений протонов разной интенсивности на амплитуду и фазу сигналов, распространяющихся в волноводе Земля – ионосфера. С другой стороны, с точки зрения геофизической задачи мониторинга состояния волновода Земля – ионосфера, необходимо выяснить можно ли по наземным измерениям амплитуд и фаз постоянно действующих сигналов антропогенной природы выяснить состояние волновода для построения прогноза его радиопроницаемости в широком диапазоне частот. Обе задачи прямая и обратная взаимосвязаны и требуют получения чистых от посторонних помех радиооткликов во время указанных событий. Для получения таких откликов необходимо либо иметь значительный объем наземных измерений радиосигналов на разных станциях для дальнейшей их обработки статистическими методами. Примером такого подхода является сеть Antarctic-Arctic Radiation-belt (Dynamic) Deposition - VLF Atmospheric Research Konsortium (AARDDVARK). Другой подход предполагает широкое применение численных методов как для моделирования условий среды, так и для моделирования распространения радиосигналов в полученных условиях соответствующим конкретным геофизическим условиям. Именно такой подход авторы использовали в представленной работе.

Рассмотрены различные события, как реальные GLE и SPE, синтетические профили концентрации электронов и профили, построенные по измерениям радара EISCAT в городе Тромсе, Норвегия. Для построения профилей использовались модели RUSCOSMICS, GDMI (Global Dynamic Model of Ionosphere) разрабатываемые силами сотрудников ПГИ и ИЗМИРАН. Международная модель нейтральной атмосферы NRLMSISE. Международная модель геомагнитного поля земли IGRF. Моделирование электромагнитных сигналов производилось численной моделью распространения электромагнитных волн, разработанной в ПГИ. Сигнал модельного источника представлял собой сумму гармонических колебаний на частотах радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 (11905, 12679, 14881 Гц).

Результаты моделирования показали сильную и однозначную зависимость амплитуды сигналов РСДН-20 от геофизических условий и менее значительную зависимость фазы сигнала.

## Оценки сжимаемости порового пространства при изменении эффективного давления (на примере Увязовского ПХГ)

---

Кузьмин Д.К., Жуков В.С., Кузьмин Ю.О.

Федеральное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

e-mail: dimak1292@mail.ru

Проведен анализ влияния пластового давления на объемную сжимаемость пластов коллекторов газа на базе экспериментальных результатов изменений их пористости при моделировании закачки и отбора газа. На основе существующих представлений о физике горных пород [Жуков, Кузьмин, 2021], разработанных математических моделей [Кузьмин, 2020] и результатов исследований керна получена оценка максимальной амплитуды оседания и поднятия земной поверхности Увязовского ПХГ, достигающая 61 мм при изменении пластового давления на  $\pm 5.0$  МПа.

Построены модели распределения вертикальных смещений земной поверхности для периодов закачки и отбора газа, показывающие, что смещения от 5мм и более, которые могут быть получены при повторных нивелирных наблюдениях, занимают площадь около 96 км<sup>2</sup> территории ПХГ. Максимум вертикальных смещений наблюдается в направлении к центру залежи, что подтверждает ее достоверность при сопоставлении с данными полевых наблюдений на ряде других ПХГ и месторождениях углеводородов [Кузьмин, 2021; Comparison of forecast, 2021].

Основной вывод данной работы заключается в том, что предложена и реализована на практике методика оценки изменения вертикальных смещений поверхности с учетом изменений пористости и сжимаемости коллекторов газа в зависимости от выбранного режима эксплуатации Увязовского ПХГ с учетом фактических данных о пористости и сжимаемости коллекторов объекта хранения газа, которая может быть использована и на других аналогичных объектах.

Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Экспериментальная оценка коэффициентов сжимаемости трещин и межзерновых пор коллектора нефти и газа // Записки Горного Института. 2021. Т. 251. № 5. - С. 658-666. - DOI 10.31897/PMI.2021.5.5

Кузьмин Ю.О. Актуальные вопросы использования геодезических измерений при геодинамическом мониторинге объектов нефтегазового комплекса / Ю.О. Кузьмин // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2020. – Т. 25. – № 1. – С. 43-54. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-1-43-54.

Кузьмин Д.К. Моделирование смещений земной поверхности, полученных различными спутниками со встроенным модулем РСА (на примере мониторинга месторождений нефти и газа) / Д. К. Кузьмин // Проблемы недропользования. – 2021. – № 2(29). – С. 94-104. – DOI 10.25635/2313-1586.2021.02.094

Comparison of forecast estimates of seabed subsidence of the Yuzhno-Kirinskoye field / V.S. Zhukov, D.K. Kuzmin, Y.O. Kuzmin, I.V. Pleshkov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 4, Yuzhno-Sakhalinsk, 06–10 сентября 2021 года. – Yuzhno-Sakhalinsk, 2021. – P. 012019. – DOI 10.1088/1755-1315/946/1/012019.

# Изменения структуры пористости при нарушении упругого характера деформирования горных пород

---

**Жуков В.С., Кузьмин Ю.О.**

Федеральное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

e-mail: vital.zhukov2018@yandex.ru

Исследованию изменений структуры порового пространства горных пород при подготовке разрушения горных пород авторами к настоящему времени посвящено ряд работ [Жуков, Салов, Кузьмин, 1991; Жуков, Кузьмин, 2003], а также показано, что наличие трещин в горных породах значительно влияет на их физические свойства [Жуков, 2012, Жуков, Семенов, Кузьмин, 2018; Жуков, Кузьмин, 2020]. Но к настоящему времени, даже на лабораторном уровне, недостаточно полно исследованы различные аспекты влияния структуры пористости и, в частности, соотношения межзерновой и трещинной пористости горных пород на характер деформирования и подготовку разрушения горных пород.

В работе рассмотрены результаты экспериментальных исследований изменений структуры пористости образцов песчаника при нарушении упругого характера деформации в процессе подготовки разрушения в условиях, моделирующих пластовые [Жуков и др., 2021]. Исследованные образцы были разделены по типу (хрупкий, упруго-пластичный и дилатансионный) деформирования и разрушения при росте дополнительного осевого сжатия. На примере характерных образцов с различными типами разрушения показаны различия характера изменения их общей пористости и ее компонент (межзерновой и трещинной). Показано, что изменения общей пористости и ее межзерновой компоненты в процессе роста осевого сжатия имеют характер, близкий к характеру изменений объёмной деформации. Выявлено, что изменения трещинной пористости проявляют модулирующий (управляющий) характер при переходе от упругого (линейного) деформирования к нелинейному (хрупкому, упруго-пластичному и дилатансионному) характеру деформирования образцов перед их разрушением.

Раздельный анализ трещинной и межзерновой компонент пористости позволил выявить, что деформационные процессы, протекающие в образце при переходе от упругих деформаций к разрушающим, сопровождаются как уплотнением породы за счет уменьшения объёма межзерновых пор, так и разуплотнением, за счет увеличения трещиной пористости. Выявлено, что компоненты общей пористости (межзерновая и трещинная) различным образом реагируют на изменения напряженного состояния и характера деформирования образцов. Показано, что начальная трещинная пористость образцов оказывает значительное влияние различия при подготовке разрушения образцов песчаника.

Установлено, что изменения трещинной пористости, несмотря на значительно меньшие её величины по сравнению с межзерновой пористостью, проявляют модулирующий (управляющий) характер при переходе от упругого (линейного) деформирования к хрупкому, упруго-пластичному и дилатансионному характеру деформирования образцов перед их разрушением. Предложено принять резкие изменения величины трещинной пористости и ее доли в общей пористости предвестниками или триггерами этих переходов.

Жуков В.С., Салов Б.Г., Кузьмин Ю.О. Деформации и трещинообразование в образцах горных пород при длительном воздействии постоянных сжимающих напряжений // В Сборнике: Модельные и натурные исследования очагов землетрясений. М.: Наука. 1991. С.156-162.

Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Физическое моделирование современных геодинамических процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень №5. 2003. С.71-77.

Жуков В.С. Оценка трещиноватости коллекторов по скорости распространения упругих волн // Вести газовой науки. 2012. №1(9). С.148-152.

Жуков В.С., Семенов Е.О., Кузьмин Ю.О. Динамика физических свойств коллекторов при разработке месторождений нефти и газа // Вести газовой науки. №5(37), 2018. С.92-87.

Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Экспериментальные исследования влияния трещиноватости горных пород и модельных материалов на скорость распространения продольной волны // Физика Земли. 2020. № 4. С.39-50. DOI 10.31857/S0002333720040109.

Жуков В.С., Кузьмин Ю.О., Тихоцкий С.А., Егоров Н.А., Фокин И.В. Изменения трещинной пористости при подготовке разрушения горных пород / В сборнике «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле – материалы 22 международной конференции». М.: ИГЕМ РАН, ГЕОХИ РАН, ИФЗ РАН. 2021. С.106-109.

## **Применение метода сглаженных частиц для исследования триггерного эффекта разрушения горных пород взрывом на композиционных имитационных моделях**

---

**Ефремовцев Н.Н., Шиповский И.Е.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), Москва, Россия  
e-mail: iv\_ev@mail.ru

Взрыв как триггер-эффект зачастую ответственен за приведение в действие того или иного процесса, кардинально изменяющего геомеханическое состояние разрабатываемого массива горной породы. Триггерные эффекты в исследованиях действия подрыва зарядов взрывчатого вещества (ВВ), заключаются, в частности, в разрушении или срыве контактов между отдельными блоками горных пород, которые рассматриваются во взаимосвязи с увеличением уровня напряжений в массиве под воздействием энергии взрыва. Рассматриваются особенности влияния на горную породу воздействия «падающего» взрыва с применением ВВ АС/ДТ-6 и дробящего действия зарядов ВВ ТНТ. Актуальность исследований обусловлена необходимостью расширения возможностей управления действием взрыва для повышения безопасности ведения взрывных работ и получения рациональной фрагментации горного массива. Для исследования закономерностей управления воздействием взрывного разрушения шпуровых и скважинных зарядов ВВ, имеющих различные конструкции и взрывчатые характеристики были апробированы три типа подходов численного моделирования процессов инициирования динамических событий и интерпретации наблюдаемых данных – это решения ряда задач плоской деформации с симметрией слоя, осесимметричной задачи, а также трехмерной задачи разрушения в пределах участка взрываемого блока горной породы. Расчетные схемы осесимметричной и плоской задач позволяют с одной стороны достаточно подробно описать поведение реальных имитационных моделей, с другой - существенно упрощают расчетный анализ процесса. Для решения рассматриваемых задач были сформулированы краевые задачи в рамках модели упругопластического тела механики сплошной среды, которые решались методом сглаженных частиц, положительно зарекомендовавшим в решении динамических задач геомеханики [1-8]. Преимущества лагранжевой, бессеточной идеологии метода сглаженных частиц позволяют при его использовании выявлять особенности волновых процессов и характер разрушения и фрагментации геосреды при больших деформациях и разлете продуктов детонации.

Решение осесимметричной задачи воздействия взрыва зарядов с воздушными промежутками позволило, в частности, установить влияния величины зазора между зарядами ТНТ и зарядной полостью на выход фракций менее 1 мм, а также выявить характер изменения выхода мелкой фракции при изменении величины зазора между зарядом и стенкой зарядной камеры и при замене индивидуальных высокоэнергетических ВВ на смесевые составы, содержащие аммиачную селитру.

В результате исследований [2, 9-13] получены функции изменения фрагментации отдельных участков взрываемых сред в зависимости от изменения тангенциальных и радиальных напряжений в характерных точках при решении задач о действии скважинных зарядов в условиях плоской деформации, от характера изменения первого инварианта тензора напряжений при использовании трехмерных моделей, а также от следующих влияющих факторов:

- расстояния от зарядов промышленных взрывчатых веществ с различной кинетикой выделения энергии;
- удельного расхода ПВВ;
- расстояния до свободной поверхности и ее конфигурации;

- диаметра заряда и расстояния между скважинами;
- величины воздушных промежутков между зарядом и стенкой зарядной полости;
- плотности ПВВ.

Важной составной частью исследований является изучение влияния энергетической насыщенности зарядов на кинетику фрагментации разрушаемых горных пород.

Список использованных источников.

1. Ефремовцев Н.Н., Трофимов В.А., Шиповский И.Е. Локализация деформаций в волновом поле, наведенном взрывом удлиненного заряда ГИАБ № 8.2020.
2. N.N. Efremovtsev, P.N. Efremovtsev, V.A. Trofimov, I.E. Shipovskii A Procedure for Rock Failure Process Analysis at Various Scales. AIP Conference Proceedings 2509, 020058 (2022).
3. Н.Н. Ефремовцев, П.Н. Ефремовцев, В.А. Трофимов, И.Е. Шиповский Результаты численных исследований фрагментации горных пород в пределах взрываемого блока с применением бессеточного метода сглаженных частиц . Взрывное Дело. 2021, 131/88.
4. Ефремовцев Н.Н., Шиповский И.Е. Численное исследование влияния параметров буровзрывных работ на равномерность разрушения массива горных пород. . ФПВГН. 8. 1. - 2021.



## О короткопериодной динамике в ядре Земли по наземным наблюдениям геомагнитных джерков

---

Рябова С.А. (1, 2), Шалимов С.Л. (1)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: ryabovasa@mail.ru

Геомагнитные джерки – это сравнительно резкие ( $V$ -образные или  $\Lambda$ -образные) изменения в скорости вековых вариаций одной (как правило, восточной) или нескольких компонент магнитного поля Земли.

При выполнении настоящих исследований привлекались данные регистрации геомагнитного поля на обсерваториях "Будков" ( $49.08^\circ$  с.ш.,  $14.02^\circ$  в.д.), "Бельск" ( $51.84^\circ$  с.ш.,  $20.79^\circ$  в.д.), "Борок" ( $58.03^\circ$  с.ш.,  $38.14^\circ$  в.д.) и обсерватории геомагнетизма Адольфа Шмидта в Нимегке ( $52.07^\circ$  с.ш.,  $12.68^\circ$  в.д.). При вычислении первых производных компонент геомагнитного поля использовались результаты инструментальных наблюдений за геомагнитным полем с 2004 по 2020 гг.

Сегментированный регрессионный анализ используется в настоящей работе в качестве метода вычисления наклона первой производной вековой вариации и его изменений. Для определения местоположения точек переключения, т.е. изменения наклона первой производной вековой вариации (в нашем случае, геомагнитный джерк) решалась задача глобальной оптимизации с помощью алгоритма дифференциальной эволюции (наиболее успешный стохастический метод глобальной оптимизации функций вещественных переменных).

Предложенный в настоящей работе метод позволил идентифицировать геомагнитные джерки 2007 г. (июнь 2007 г.), 2011 г. (октябрь 2011 г.), 2014 г. (январь 2015 г.) и 2017 г. (март 2018 г.). Трудности с идентификацией джерков 2011 г. и 2014 г. в северной и вертикальной компонентах геомагнитного поля, вероятно, связаны с тем, что годы, близкие к солнечному максимуму, более загрязнены внешними эффектами по сравнению с годами солнечного минимума.

Для интерпретации экспериментальных результатов, показавших, что джерки следуют с квазипериодом 3-4 года, предложен механизм возникновения быстрых изменений геомагнитного поля, обусловленный нестабильными процессами в ядре Земли.

## Эффекты триггирования актов сейсмодинамических разрушений в ледяном покрове Байкала

---

Пономарёва Е.И.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ  
ЗЕМНОЙ КОРЫ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, Иркутск, Россия  
e-mail: Squirrel@crust.irk.ru

В рамках экспедиционных исследований, проводимых Институтом земной коры СО РАН и Томским институтом физики прочности и материаловедения, были зафиксированы триггерные эффекты разной природы при актах сейсмодинамического разрушения ледяного покрова. Также применялись техногенные триггерные воздействия для плавной разгрузки избыточных напряжений в ледяном покрове.

Причины деформирования ледяного покрова Байкала в одноименной рифтовой впадине ранее уже освещались в работах (Ружич, Псахье, Черных и др., 2011., Пономарёва 2012, и др.). Показано, что главным энергетическим источником воздействий является тепловое расширение ледяного покрова при резких потеплениях в дневное время, что приводит к ускоренному нарастанию напряжений, деформированию и динамическому разрушению ледяного покрова Байкала в виде ледовых ударов с энергиями, достигающих значений  $Lg E=105-108$  Дж. На этом фоне в качестве триггера значимую роль играют ветровые порывы. В пределах Байкальской впадины характерно ветровое воздействие на ледяной покров нескольких ветров разных направлений. К таким относятся ветра: «Сарма», «Горный», скорость которых скачкообразно может достигать 40-50 м/с, а также ветры «Верховик», «Култук», «Баргузин». Полевые наблюдения с измерениями смещений по магистральным трещинам в ледяных полях деформометрическими приборами и станциями GPS показали, что ураганные ветра вносят значимый вклад в деструкцию ледовых пластин. Другой тип природных триггерных воздействий связан с сейсмическими воздействиями не только от местных землетрясений интенсивностью сотрясений 6-7 баллов и выше, но также и от сильных сейсмических катастроф на дальних расстояниях. Например, от катастрофического землетрясения в Японской провинции Тохоку 11.03.2011 г. ( $M = 9,1$ ), с эпицентром на удалении 3270 км. Его отклики проявились спустя 7 ч. 46 мин. после события в виде повсеместно распространенных подвижек в полузамерзших магистральных ледовых трещинах в течение нескольких часов. Многочисленные ледовые удары регистрировались на всей акватории озера.

Экспериментально, в качестве отработки методологии управляемых техногенных триггерных воздействий на участки многокилометровых магистральных трещин, были применены мощные гидравлические домкраты, специальные вибраторы, проезд автомобильной техники на разных скоростях, а также слабые подледные взрывы в металлических обоймах с навесками пороха 0.1 кг. Были изучены отклики на инициированные слабыми взрывными воздействиями смещения, которые происходили с различными скоростями и сейсмоакустическими активизациями. В частности установлено, что проведение пространственно-распределенных слабых взрывов в промерзших магистральных трещинах на расстояниях друг от друга в 20-30 м. приводит к последовательному вскрытию сегментов трещины без проявления высокоэнергетических ледовых ударов. В результате, в экспериментальном сегменте магистральной трещины фиксировалось: 1) снижение энергетического уровня сейсмоакустического фона на несколько часов и 2) отсутствие значимых по амплитуде сейсмических актов в течение нескольких суток.

Сделан вывод о том, что указанным способом триггирования смещений распределенным во времени и пространстве серийными слабыми взрывами, есть возможность осуществлять демпфирование сильных ледовых ударов в определенных сегментах магистральных трещин. Также

установлено, что высокоэнергетическое триггерное воздействие в виде сильных инициированных ледовых ударов на высоконапряженные ледяные поля способно вызвать всплески сейсмической активности.

Ружич В. В. Псахье С.Г., Черных Е.Н., Шилько Е.В., Левина Е.А., Пономарёва Е.И. О разработке способов прогноза ледовых ударов средствами физического моделирования // Международная конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (Томск, 5-9 сентября 2011 г.): тез. докл. - Томск: ИФПМ СО РАН, 2011. - С. 444-445.

## Вариации слоя Es над Новосибирском в 23 и 24 солнечных циклах

---

**Белинская А.Ю.**

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), Новосибирск, Россия

e-mail: BelinskayaAY@ipgg.sbras.ru

На ионосферной станции в г. Новосибирск (54,84° с.ш., 83,23° в.д.) ведутся непрерывные наблюдения методом вертикального зондирования с конца 60-х годов XX века. С 1995 года установлен цифровой ионозонд «ПАРУС», благодаря чему был накоплен архив данных в цифровом виде. Для исследования морфологических особенностей поведения ионосферы над Новосибирском в качестве параметров, характеризующего состояние нижней ионосферы, были выбраны критическая частота и действующая высота слоя Es (соответственно, foEs и h'Es). Накопленный материал позволил проанализировать вероятности наблюдения (PEs) этого слоя в каждом месяце в зависимости от времени суток и высоты появления за период с 1996 г. по 2021 г., который охватывает 23 и 24 одиннадцатилетние солнечные циклы. Не выявлено непосредственной зависимости от уровня солнечной активности, которая была представлена числами Вольфа (числом пятен на Солнце). 23-й цикл солнечной активности начался в мае 1996 года и завершился в январе 2009 года. Он продолжался 12,6 года. Максимум отмечен в марте 2000 и вторичный максимум - в ноябре 2001 года, минимум – в декабре 2008 г. 24-ый цикл был несколько слабее, он начался в декабре 2008 года и закончился в декабре 2019 года, максимум был в апреле 2014 года, он длился 11 лет. PEs проявляет явную зависимость от сезона и часа суток. В январе-феврале 2002 года слой Es практически не наблюдался (PEs=15%), когда как в другие года эта величина достигалась 40-45%. В июле и августе появление слоя Es практически 100%. Обсуждаются условия аномальных вариаций спорадического слоя над Новосибирском. Обсуждаются формирование слоя Es во время подготовки и реализации землетрясений в области 200-300 км от ионосферной станции.

# О разработке сейсмогеологического подхода к среднесрочному прогнозу землетрясений в Байкальской рифтовой зоне

Ружич В.В., Левина Е.А., Пономарева Е.И.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

e-mail: Ruzhich@crust.irk.ru

Разработка методологического подхода к выявлению очагов землетрясений, готовящихся в Байкальской рифтовой зоне, осуществляется в ИЗК СО РАН с 2001 г. во временных рамках среднесрочного прогноза землетрясений (1-11 лет). Основной акцент сделан на выяснении многофакторных условий подготовки землетрясений при полевом изучении геолого-геофизических условий, влияющих на подготовку очагов землетрясений в эксгумированных глубинных сегментах разломов, с привлечением натуральных экспериментов ледовой и геологической средах. Также ведется анализ каталога землетрясений, представляемого Байкальским филиалом Единой геофизической службы РАН г. Иркутска.

С применением разработанной ГИС «Prediction» постоянно анализируются поступающие сведения о режимах сейсмической активности, с акцентом на изучение условий подготовки шокового события. Интерпретация многолетних наблюдений за параметрами подготовительного сейсмического режима показала, что в пределах БРЗ очаги произошедших сильных землетрясений с  $K \geq 13$  ( $M \geq 5.0$ ) возникали преимущественно в приграничных районах сейсмических брешей в зонах высокоранговых активных разломов или разломных узлов [Ружич, 1997]. Позднее, при проведении физического моделирования на участках разломов был выяснен механизм формирования источников излучения сейсмических импульсов в участках активных смещений берегов разломов с неровностями [Ostapchuk et al., 2019]. Из анализа полученных сведений о современной структуре сейсмического поля БРЗ выявлены особенности сейсмических режимов в зонах разломов за несколько лет или десятилетий до моментов сильных и сильных землетрясений с  $M \geq 5.0$ . В этой сейсмологической информации содержатся сведения о приближении шокового события в виде двух стадий: нарастающей предшоковой сейсмической активизации на периферии области затишья и стадии сейсмического затишья. С учетом результатов натуральных экспериментов на реальных геологических объектах и физического моделирования было установлено, что подобный режим свидетельствует о приближении момента косейсмического вспарывания прочностных барьеров или разрушения крупных неровностей в некоторых сегментах магистральных разломов. Путем определения энергетических параметров предшоковой активизации и длительности сейсмического затишья появляется возможность на основании расчетов с применением ГИС оценивать энергии готовящихся шоковых событий ( $E$ ) - и оставшееся время их подготовки до момента реализации ( $T$ ). Данные выводы подкреплены анализом накопленных сведений по произошедшим событиям в БРЗ в рамках разрабатываемого сейсмогеологического метода среднесрочного прогноза. Оценки прогноза по параметрам “ $E$ ” и “ $T$ ” в настоящее время производятся на стадии апробации.

В дополнении к изложенному в рамках среднесрочного прогноза есть возможность оценивать параметры энергии и мест расположения очагов готовящихся сильных землетрясений путем анализа явлений сеймотектонической сегментации разломов, с выделением сейсмоактивных участков и асейсмических участков в течение последних десятков лет. Согласно известным и обоснованным представлениям, изложенным, например, в работах [Lezzi, et al, 2019; Langridge, et al., 2003; Leonard, 2010], магнитуды в сегментах разломов с учетом протяженности сейсмических брешей ( $L$ ) возможно оценивать согласно эмпирическим корреляционным соотношениям  $L / MW$

В качестве оценок промежуточных результатов реализации среднесрочного прогноза в БРЗ использовались сводки и карты среднесрочного прогноза землетрясений официально посылаемых в органы МЧС Иркутской области за период ожидания 18.09.2019 - 20.01.2021 г. с указанием

мест расположения готовящихся очагов землетрясений с энергетическим классом  $K \geq 13$  ( $M \geq 5.0$ ). Согласно анализу за временной интервал длительностью 1.5 года в ожидаемые места попало 82% эпицентров произошедших землетрясений с классом  $K \geq 13$  ( $M \geq 5.0$ ), включая очень сильные афтершоки Хубсугульского землетрясения (2021,  $M=6.8$ ). Такой итог можно признать удовлетворительным на рассмотренном этапе исследований.

# О связи временных вариаций сейсмичности Северного Тянь-Шаня с фазами лунно-солнечных циклов

Виляев А.В.

Товарищество с ограниченной ответственностью "Институт сейсмологии" Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан, Алма-Ата, Казахстан

e-mail: vilayev@gmail.com

Рассмотрена волновая динамика сейсмичности Северного Тянь-Шаня, которая проявляется в виде сейсмических активизаций и затиший, в том числе, в виде периодических сеймотектонических деформаций земной коры.

Комплекс формализованных параметров представлен выделившейся сейсмической энергией  $E$ , числом произошедших землетрясений  $N$ , сейсмической активностью  $A_{10}$ , рассчитываемыми для узлов регулярной сети  $1 \times 1$  градус в скользящем временном окне 5 лет со сдвигом в 1 год на площади радиусом 0.3 градуса для каждого узла, начиная с 1960 г. Оценки сделаны для территории наиболее сейсмоактивной части Юго-Восточного Казахстана, ограниченной координатами  $41^\circ \div 46^\circ$  с.ш. и  $75^\circ \div 81^\circ$  в.д. Нижний энергетический уровень землетрясений определен как  $K = 9.0$ , что соответствует уровню надёжной регистрации для Северо-Тянь-Шанской сейсмоактивной зоны. Оценки выполнены с включением афтершоков.

В динамическом спектре сейсмической активности  $A_{10}$  и кумулятивной энергии  $E$  выделены гармоники 9, 11, 18, 22, 25, 42 года. Из них наибольшей спектральной мощностью обладают 18-ти летняя (приливной вековой лунный период) и 22-х летний солнечный цикл Хейла (изменение полярности магнитных характеристик Солнца). Выделенный 25-ти летний период представляет биение взаимных гармоник 18-ти летней и двойного Хейловского. Результаты подтверждены ранее в вариациях механизмов очагов землетрясений на Северном Тянь-Шане и Джунгарии от взбросового типа к сбросо-сдвиговому в связи с 22 летним циклом Хейла [1].

Методом фазовых траекторий [2, 3] рассчитаны фазы лунного 18-ти летнего периода и фазы Хейловского цикла для значимых землетрясений региона Средней Азии ( $K \geq 12.0$ ) начиная с 1885 г. Продолжительность и минимумы солнечных циклов получены по данным [4]. За нулевой отсчет фазы лунного цикла приняты эпохи максимального склонения Луны (одна из фаз 1932.00). На фазовой плоскости построено распределение сильных землетрясений с линейной интерполяцией магнитуд для выделения «опасных» временных периодов. Дан вероятностный долго-среднесрочный временной прогноз на период 2021-2031 гг. Оценка места возможного землетрясения не рассматривалась.

## Литература

1. Полешко Н. Н., Досайбекова С., Хачикян Г. Я. Вариации механизмов очагов землетрясений на Северном Тянь-Шане и Джунгарии: связь с 22 летним циклом в магнитном поле Солнца. // Вестник НЯЦ РК, вып.2, 2016. С. 162-165

2. Широков В. А., Серафимова Ю. К. О связи 19-летнего лунного и 22-летнего солнечного циклов с сильными землетрясениями и долгосрочный сейсмический прогноз для северо-западной части Тихоокеанского тектонического пояса // Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. № 8. С. 120–133.

3. Серафимова Ю. К., Широков В. А. Прогнозирование сильных землетрясений, вулканических извержений и цунами на основе изучения их связи с лунным приливом 18.6 г. и 22-летним Хейловским циклом солнечной активности. В кн. Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. - 2012. С.305-325

4. <https://www.sidc.be/silso/cyclesmm>

# Поведение напряжений в окрестности особых точек и особых линий для трещин в упругом материале

---

**Звягин А.В.**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

e-mail: zvyagin.aleksandr2012@yandex.ru

Трещины являются одним из основных объектов изучения в механике разрушения. Как правило, они моделируются поверхностью в трёхмерном случае (или кривой, в двумерном случае) на которой терпит разрыв поле перемещений. В упругой постановке точки границы трещины являются особыми. В этих точках напряжения бесконечны. Эта особенность характеризуется коэффициентами интенсивности напряжений (КИН). Стандартной задачей механики трещин является определение зависимости КИН от геометрии задачи и параметров внешней нагрузки. Это важно, поскольку достижение коэффициентами интенсивности критических значений определяет устойчивость и направления возможного роста трещин.

В данной работе исследуется влияние особенностей геометрии поверхности трещин на коэффициенты интенсивности напряжений. В двумерном случае характерной особой точкой для трещины является точка излома. В пространственном случае трещина может иметь линию излома поверхности. Кроме того, границы трещины в трёхмерном упругом теле могут иметь угловые точки. Наличие таких особенностей геометрии приводит к особому поведению напряжений в окрестности угловых точек и точек излома. Точка границы трещины уже является особой, а если она является ещё и угловой, или принадлежит линии излома, то уже существующая особенность может, как усиливаться, так и ослабляться.

Для рассматриваемых задач аналитические решения практически отсутствуют, поэтому единственной возможностью теоретического исследования является использование численных методов механики трещин. Авторами созданы и верифицированы пакеты программ, позволяющие с достаточной степенью точности вести расчеты поле перемещений и напряжений для систем произвольно ориентированных трещин достаточно общей геометрии. С их помощью проведены исследования полей напряжений и КИН в окрестности угловых точек и точек (или в трёхмерном случае линий) излома. Например, для прямоугольной в плане трещины в угловой точке не определена нормаль к границе. Задача исследования поведения напряжений в окрестности такой точки является новой. По классическому определению коэффициента интенсивности напряжений в данной задаче его значение зависит от выбора нормали, по которой мы подходим к границе. Такие же проблемы важны для выяснения влияния размеров звеньев и угла излома на КИН трещины в трёхмерной и двумерной постановке. Полученные авторами результаты исследований перечисленных задач и являются предметом представляемой работы.



## **Инициирование сверхдвигового режима распространения разрыва землетрясения**

---

**Кочарян Г.Г., Будков А.М., Кишкина С.Б.**

Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия

e-mail: gevorgkidg@mail.ru

Одной из проблем, вызывающих в последние годы повышенное внимание геофизиков и механиков, является выявление при некоторых землетрясениях участков разрыва с необычайно большой скоростью распространения, превышающей величину скорости волны Релея  $CR$ , являющуюся максимально возможной для скорости роста трещины в рамках традиционных аналитических моделей механики разрушения

В докладе приводится краткий анализ накопленных в последние годы сведений о распространении «быстрых» разрывов при землетрясениях, в контексте особенностей структуры разломных зон. Проведено качественное сопоставление результатов наблюдений с результатами численных расчетов формирования сверхдвигового разрыва вдоль однородной и гетерогенной поверхности разрыва.

Результаты расчета на простой модели не противоречат данным сейсмологических измерений, отражая такие наблюдательные факты, как постепенное увеличение скорости распространения разрыва, ускорение и замедление разрыва, более высокую вероятность возникновения «сверхдвигового» разрыва на «проработанных» участках разлома с более плоскими, широкими “asperities”, возможность распространения «сверхдвигового» разрыва на большие расстояния и его внезапную остановку.

На гетерогенной поверхности контакта необходимым условием трансформации разрыва в сверхдвиговый режим является наличие достаточного количества контактных пятен “asperities” для которых характерно достаточно быстрое фрикционное разупрочнение контакта при сдвиге. При этом, чем более «хрупкое» пятно (ниже величина остаточной фрикционной прочности по сравнению с пиковым значением), тем при более низком уровне средних напряжений может произойти переход к сверхдвиговому разрыву. Повышенная микрошероховатость контактной области увеличивает фрикционную «хрупкость» пятна увеличивая, тем самым вероятность инициирования сверхдвигового разрыва.

Неоднородность мезомасштаба приводит к усложнению волновой картины, появлению интервалов снижения и увеличения скорости распространения разрыва и амплитуды косейсмического смещения. После выхода на длинный участок со стабильным трением, сверхдвиговый разрыв продолжает распространяться со скоростью, близкой к скорости продольной волны, хотя амплитуда дифференциального движения затухает. В конечном итоге, разрыв останавливается, встретив запертый участок, для разрушения которого амплитуды динамического воздействия уже недостаточно.

Неоднородности макромасштаба – систематические изменения свойств разлома вдоль простирания ведут к увеличению вероятности возникновения «быстрых» разрывов на более древних участках разлома.

## Анализ нижней ионосферы по распространению сигналов от передатчиков РСДН-20, регистрируемых в авроральных и приполярных областях

---

Сидоренко Д.И., Никитенко А.С., Пильгаев С.В., Ларченко А.В.,  
Филатов М.В., Федоренко Ю.В.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт»,  
Апатиты, Россия

e-mail: Smychok@yandex.ru

В докладе приводятся результаты анализа записей горизонтальных компонент магнитного поля и вертикальной компоненты электрического поля сигналов СДВ передатчиков российской фазовой радионавигационной системы «Альфа» (Радиотехническая система дальней навигации РСДН-20), регистрируемых в Арктике в авроральной и приполярной областях. Запись электромагнитного поля велась с 2017 г до настоящего времени. Непрерывная регистрация проводилась в двух стационарных точках: в геофизической станции «Ловозеро» (67.98 N; 35.08 E) Полярного геофизического института и научно-исследовательской базе «Баренцбург» (архипелаг Шпицберген, 78.093 N; 14.208 E). Эпизодические наблюдения проводились в период морской экспедиции «Трансарктика 2019» на дрейфующем научно-экспедиционном судне «Академик Трёшников» в окрестности архипелага Земля Франца-Иосифа и комплексной арктической экспедиции «Умка 2021» на Земле Франца-Иосифа.

Исследованы временные вариации амплитуд и фаз сигналов, а также структуры электромагнитного поля в точках наблюдений. Отметим, что в отличие от большинства приемников, применяемых для такого рода исследований, в нашем случае использовался разработанный в ПГИ ОНЧ регистратор, позволяющий в дополнение к измерению двух горизонтальных компонент магнитного поля  $H_x$  и  $H_y$  вести регистрацию вертикальной компоненты электрического поля  $E_z$ . Это дает возможность рассмотреть вариации волнового импеданса, изменения которого могут служить индикатором возникновения локальных неоднородностей нижней ионосферы. Рассмотрены события, зарегистрированные в магнитоспокойное время и в периоды гелиогеофизических возмущений. Для интерпретации результатов, наблюдения сопоставлены с результатами моделирования распространения сигналов от передатчиков в волноводе Земля — ионосфера. Моделирование проводилось с использованием программы LWPC, а также численного решения волнового уравнения в плоскостной среде.

## **Расчет изменения поля статистических напряжений в окрестности техногенного техногенного землетрясения**

---

**Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г., Будков А.М.**

Федеральное государственное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: s-b-kish@yandex.ru

Изучение техногенной сейсмичности, вызванной горными работами, остается одним из актуальных научных направлений. Такое крупное землетрясение как Бачатское и результаты регистрации последовательности его афтершоков представляются хорошей базой для анализа разных аспектов крупного техногенного события.

С опорой на эти данные исследовался характер и величина изменения параметров поля тектонических напряжений в районе горных работ в результате подвижки в очаге техногенного землетрясения, были выполнены численные и аналитические расчеты разгрузки массива из-за образования котлована и дополнительной пригрузки из-за формирования отвалов породы как двух основных факторов техногенного воздействия на статическое поле напряжений.

Оценка изменения поля статических напряжений, вызванных землетрясением, была выполнена путем вычисления изменения сдвиговых и нормальных напряжений в окрестности инициирующего очага. Расчеты продемонстрировали, что остаточные вариации напряжений даже крупного землетрясения быстро убывают по мере удаления от его источника. Для Бачатского землетрясения ( $M_L=6$ ) на расстоянии менее 20 км вдоль оси разлома и на расстоянии менее 10 км перпендикулярно ему вариации функции Кулона быстро снижаются до величин, меньших 0,1 МПа. При этом показано, что области положительного приращения (до 1,5 бар) кулоновского напряжения хорошо согласуются с областью регистрации большинства афтершоков на отмеченных глубинах.

Таким образом, возможность карьерных взрывов влиять на сейсмическую обстановку, вероятно ограничена районом радиуса не более нескольких километров (для самых больших по площади карьеров). При этом следует учитывать, что время землетрясения, подготовленного природным ходом событий, может быть несколько приближено, если очаг потенциального события окажется непосредственно под карьером.

## Возбуждение волновода Земля-ионосфера на частотах вблизи поперечных резонансов ионосферным и наземным источниками

---

Ларченко А.В., Лебедь О.М., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт»,  
Апатиты, Россия

e-mail: alexey.larchenko@gmail.com

Рассмотрены экспериментальные данные регистрации сигналов естественного и искусственного происхождения в период проведения нагревного эксперимента на стенде «EISCAT/Heating» (г. Тромсе) в 2016 году. При воздействии на ионосферу мощным модулированным КВ радиоизлучением на высотах D-слоя за счет увеличения электронной температуры, и, соответственно, частоты столкновений электронов, происходит модуляция проводимости ионосферы. Под действием внешнего электрического поля аврорального электроджета происходит генерация модулированных токов и электромагнитной волны с частотой модуляции. В докладе рассмотрены результаты регистрации на сети высокоширотных станций ПГИ сигналов образованного таким образом ионосферного источника с частотами (1817 и 2017 Гц) близкими к частоте первого поперечного резонанса. Показано, что поляризация горизонтального магнитного поля с расстоянием от источника стремится к полностью круговой левой. Оценки углов падения волн с расстоянием снижаются (в самой удаленной точке на obs. Баренцбург составляют 15-35 град.). Схожим поведением обладают и сигналы твик-атмосфериков зарегистрированных в период проведения нагревного эксперимента.

Методами численного моделирования исследованы особенности возбуждения волновода Земля-ионосфера на данных частотах. Рассмотрены два типа источников электромагнитного поля: молниевые разряды, представленные осциллирующим вертикальным токовым диполем, находящимся в волноводе; токи в D-области ионосферы, вызванные изменениями холловской и педерсоновской проводимостей при нагреве ионосферы. Проведен анализ коэффициентов отражения ионосферы и возбуждаемых волноводных мод в условиях дневной и ночной нижней ионосферы. Проведено сравнение результатов наблюдений и моделирования процессов генерации и распространения электромагнитных волн СНЧ/ОНЧ диапазона в волноводе Земля — ионосфера.

## Воздействие обводненности на распределение магнитуд сейсмических событий в Хибинском массиве

---

Баранов С.В. (1), Жукова С.А. (2), Моторин А.Ю. (1)

(1) Кольский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Апатиты, Россия

(2) Горный институт - обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

e-mail: bars.vl@gmail.com

На изменение геодинамического режима Хибинского массива значительное влияние оказывают крупномасштабные горные работы, проводимые на протяжении более 90 лет. Спецификой месторождений Хибинского массива являются: высокий уровень горизонтальных тектонических напряжений, наличие хрупких высокопрочных пород, а также разломных структур, заполненных в основном шпрудштейнизированными рыхлыми породами, глубина разработки и объем ежегодно извлекаемой горной массы, что определяет их удароопасность.

Большинство тектонических нарушений вскрыты на поверхности горными работами, что способствует беспрепятственному проникновению атмосферных вод вглубь массива горных пород. В связи с этим изменяются физико-механические свойства участков массива и повышается вероятность подвижки блоков по геологическим структурам. В целом совокупность всех факторов приводит к повышению сейсмической активности, однако триггером мощного сейсмического события может быть и какой-то один из них, например, повышение обводненности массива горных пород.

По данным многолетних сейсмологических наблюдений и многолетнего мониторинга водопротоков, проводимых на месторождениях Хибинского массива, выявлена зависимость распределения магнитуд природно-техногенных сейсмических событий от уровня обводненности среды. В частности установлено значимое снижение параметра  $b$  (наклон графика повторяемости) распределения магнитуд Гутенберга-Рихтера в период высокой обводненности в мае-июне, который обусловлен таянием выпавшего за зиму снега. В осенние месяцы значение параметра  $b$  возрастает до уровня начала снеготаяния. Физический механизм, объясняющий данное явление, заключается в росте кулоновских напряжений по причине снижения эффективного нормального напряжения и уменьшении коэффициента трения на контакте геологическая структура - блок горного массива за счет увеличения порового давления, вызванного ростом обводненности среды. Параметр  $b$  определяет пропорцию сильных и слабых сейсмических событий. При уменьшении (увеличении)  $b$  возрастает (снижается) доля сильных событий. Таким образом, зависимость наклона графика повторяемости от уровня обводненности необходимо учитывать при оценке удароопасности на месторождениях Хибинского массива. Исследование выполнено при поддержке РФФ, проект № 22-27-20125.

## **Развитие концепции направленного взрывания сближенными скважинными зарядами**

---

**Викторов С.Д., Закалинский В.М., Одинцев В.Н., Шиповский И.Е.,  
Мингазов Р.Я.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия  
e-mail: vmzakal@mail.ru

Разрушение горных пород взрывом останется в обозримой перспективе основой почти всех применяемых геотехнологий, как при подземной, так и при открытой разработке рудных и значительной части нерудных месторождений. Современный уровень развития взрывных работ требует новых возможностей управлением взрыва при различных технологических процессах. Это возможно путем использования различных прицепов управления энергетическим распределением в массиве горных пород. Идея данной реализации заключается в воспроизводстве единого заряда заданной массы и формы путём её рассредоточения в нескольких зарядах меньшего размера, расположение которых имитирует форму основного заряда. При этом представляет интерес вопрос о роли триггер-эффектов при взрыве сближенных зарядов. Это обстоятельство открывает возможности управления процессом взрывного разрушения горного массива в технологических целях, связанные с целенаправленным изменением условий формирования и формы интегральной волны пучкового (деконцентрированного) заряда. В этом случае известные традиционные методы управления взрывом монозарядов становятся, в различных сочетаниях, средством для создания условий взаимодействия цилиндрических волн, при которых из нескольких симметричных относительно оси зарядов потоков энергии формируется технологически обусловленный асимметричный по плотности потока энергии фронт разрушения обуренного массива.

Огромное многообразие горно-геологических, гидрогеологических, физико-химических и технических факторов, влияющих на количественные и качественные показатели взрывной отбойки, привело к созданию разветвленной системы методов управления действием взрыва.

В ИПКОН РАН разработана и предложена классификация методов управления промышленными взрывами по технологическим факторам. Всего классификацией охвачено 50 методов управления взрывом, которые разбиты на 5 классов, включающих II группы.

В первый класс входят методы управления взрывом путем подбора и регулирования свойств ВВ, СВ и заряда. Три группы этого класса включают в себя девять методов управления взрывом. Все эти методы управления связаны с подбором и регулированием таких свойств как теплота взрыва, скорость детонации, плотность заряжания, компонентный состав заряда, его стабильность по высоте и во времени, интервалы замедления и др. Методы управления первого класса могут взаимно дополнять друг друга.

Во второй класс входят методы управления взрывом путем подбора и регулирования удельного расхода ВВ и параметров рассредоточения ВВ в отбиваемом массиве. Три группы этого класса включают в себя шестнадцать методов управления взрывом. Эти методы связаны с регулированием удельного расхода ВВ, параметров сетки скважин, ЛНС, ЛСПП, перебура, диаметра заряда, схем обурирования, угла наклона скважин, числа и формы обнаженных поверхностей, положения естественных и техногенных экранирующих поверхностей и др. Эти методы широко применяются на практике.

В третий класс входят методы управления взрывом путем подбора и изменения формы и конструкции заряда. Три группы этого класса включают в себя 10 методов управления взрывом. В последние десятилетия эти методы интенсивно совершенствуются и находят все более широкое применение в практике ведения взрывных работ.

В четвертый класс входят методы управления взрывом путем подбора схем и изменения последовательности взрывания зарядов. Две группы этого класса включают в себя 6 методов управления взрывом.

В пятый класс входят методы управления взрывом путем повышения безотказности взрывания зарядов. Три группы этого класса, включают в себя 9 методов управления взрывом.

Настоящая работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям, позволяющим обосновать, разработать и развить концепцию нового способа управления направленным действием взрыва пучковыми скважинными зарядами.

Разрабатываемый универсальный подход к управлению распределением энергии, открывает новые возможности интегрально включая в себя весь уже накопленный арсенал известных приемов и средств.

# Статистический анализ прогностической эффективности ионосферных предвестников землетрясений Камчатского региона

---

**Богданов В.В., Павлов А.В.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия

e-mail: pavlov@ikir.ru

Существует прямая зависимость между солнечной активностью и процессами в магнитосфере, ионосфере и литосфере Земли. Однако существует и обратная связь, определяющая влияние литосферных процессов сейсмоактивных регионов на физические процессы, протекающие в верхних геосферных оболочках. В сейсмоактивных регионах любые аномальные изменения в поведении параметров ионосферы, которые формируются на фоне регулярного суточного изменения характеристик ионосферы, обусловленного влиянием Солнца, могут дать информацию о процессах подготовки землетрясений. При этом каждый сейсмоактивный регион характеризуется своими, наиболее информативными особенностями (аномалиями) в поведении параметров ионосферы, которые могут быть отождествлены с предвестниками землетрясений.

В ходе вертикального радиозондирования ионосферы на ионосферной станции, расположенной в с. Паратунка, накануне наступления землетрясений в Камчатском регионе регистрировались следующие ионосферные возмущения: превышение текущих значений критической частоты  $f_oF_2$  ионосферного слоя F2 над медианными значениями в периоды возмущённого состояния магнитосферы, высыпание заряженных частиц из радиационных поясов в ионосферу (образование К-слоя), образование спорадического слоя Es типа r, появление на ионограммах рассеянных отражений в области F (F2-spread) на фоне спокойной магнитосферы, расслоение следа отражения на ионограммах в области F по частоте и высоте. Для указанных ионосферных возмущений был проведен статистический анализ их прогностической эффективности для землетрясений с магнитудой  $M \geq 5.0$ , произошедших в Камчатском регионе за временной период 2013-2021 гг. На основе комплекса ионосферных параметров, имеющих наилучшую прогностическую эффективность, предложена методика краткосрочного прогноза сейсмических событий с магнитудой  $M \geq 5.0$  и периодом ожидания землетрясения до нескольких суток. Ретроспективный анализ прогностической эффективности этой методики показал, что прогноз по данной методике статистически значим и отличается от случайного угадывания.



## Предельно напряженное состояние земной коры как среда для инициирования триггерных геодинамических явлений

---

**Батугин А.С.**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

e-mail: as-bat@mail.ru

Рассматриваются особенности проявления горно-тектонических ударов на шахтах и землетрясений в индустриальных районах с глубоким расположением гипоцентра, техногенная природа которых является предметом дискуссий. Отмечено характерное соотношение размера очаговой зоны  $R$  к глубине  $H$  гипоцентра, расположение гипоцентра глубже зоны антропогенного воздействия или в стороне от него. Для объяснения феномена влияния инженерной деятельности на проявление сильных (до  $M=8$ ) сейсмических событий с гипоцентром на большой глубине привлекается гипотеза проф. Петухова И.М. о предельно напряженном состоянии земной коры. При  $R/H > 1$  зона очага сейсмического события занимает некоторый объем от земной поверхности и до определенной глубины. Принимая зону очага как область деструкции и достижения предельно напряженного состояния земной коры, делается вывод, что инженерная деятельность на поверхности в таких местах оказывает непосредственное воздействие на крупную зону предельно напряженного состояния горного массива, что при выполнении условий неустойчивости (несоответствие скорости нагружения и предельной скорости деформирования массива) служит триггером сильного горного удара или землетрясения с большой глубиной гипоцентра. В результате техногенного воздействия на такие зоны новые участки земной коры переходят в предельно напряженное состояние, что запускает сейсмический процесс с глубинами гипоцентров сейсмических явлений значительно большими, чем глубина зоны техногенного воздействия, и проявлением наиболее сильных событий на периферии сейсмоактивной зоны. Природа геодинамических событий, происходящих вне горных выработок и на значительно больших глубинах, чем зона техногенного воздействия, а также на периферии сейсмоактивной зоны, понимается как реакция на переход горных массивов в предельно напряженное состояние в результате взаимодействия локальных геомеханических и региональных геодинамических процессов.

# Численное моделирование механического поведения пороупругопластического искусственного материала в процессе проведения гидроразрыва пласта

---

Гребенщикова Е.М. (1, 2), Начев В.А. (1, 2)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

e-mail: grebenshchikova.em@phystech.edu

В данной работе приводятся результаты численного моделирования механического поведения пороупругопластических материалов, воспроизводящих фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов. Авторы выполняют численное моделирование лабораторных экспериментов, проведенных ранее в ИДГ РАН на установке, позволяющей исследовать распространение трещин в условиях трёхосного нагружения. Численное моделирование выполняется для исследования динамики распространения трещины при различных условиях нагружения, для этого в работе учитываются поровые и упругопластические свойства исследуемой среды.

Для исследования траектории распространения и формы трещины ГРП в пороупругопластических искусственных материалах авторы подготовили математическую модель (задали систему определяющих уравнений и критерии разрушения) и затем подготовили численные модели с использованием механического программного пакета. Трёхмерная численная упругопластическая модель горной породы была построена на основании геометрии образца. Моделирование включает задание набора механических параметров: модуля Юнга, коэффициента Пуассона, угла внутреннего трения, угла дилатансии и деформационного критерия разрушения. В исследовании мы использовали готовые физические и математические механические модели, зависящие от давления, Друкера-Прагера и Мора-Кулона и учитывали поровое давление. Далее была выполнена серия численных механических расчетов, используя расширенный метод конечных элементов.

В результате проведенного численного моделирования с использованием программного пакета получено, что в пороупругопластической модели образца перед образованием трещины возникает зона пластичности в области центральной скважины и затем по мере распространения трещины зона пластичности вдоль пути распространения трещины сохраняется. В результате расчета НДС вдоль линии трещины получены несимметричные распределения напряжений, давлений и пористости относительно центральной скважины из-за различных значениями давлений в нагнетательной и добывающей скважине, что возможно приводит к образованию разных длин трещин в сторону добывающей и нагнетательной скважины, что мы видим при проведении лабораторных экспериментов.

## Влияние обратного напряжения на давления открытия и закрытия трещины гидроразрыва

---

**Новикова Е.В., Тримонова М.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского, Москва, Россия

e-mail: elena.novikova.v@yandex.ru

Гидроразрыв пласта (ГРП) представляет собой механическое воздействие закачиваемой жидкости разрыва на продуктивный нефтяной пласт. В результате данного процесса в среде образуется трещина гидроразрыва. На ее распространение в пласте влияет множество факторов, такие как характеристики породы, характеристики жидкости разрыва, и в особенности поле напряжений, которое реализуется в пласте в месте распространения трещины. Одной из величин, которой всегда уделялось наибольшее внимание, является минимальное напряжение, реализующееся в пласте с трещиной гидроразрыва. В ходе данной работы были теоретически вычислены давления образования трещин, давления закрытия трещины. Соответственно, вычислялись минимальные значения напряжений модельного образца, в котором производилось образование и распространение трещины гидроразрыва. Полученные значения сравнивались с реальными значениями, которые известны из условий лабораторных экспериментов.

Была проведена серия лабораторных экспериментов по гидроразрыву пласта с использованием специальной установки. В течение каждого из экспериментов производилась запись давления в зависимости от времени в скважине, в которой создавалось ГРП. После анализа полученных зависимостей были вычислены значения давлений закрытия трещин гидроразрыва. Согласно стандартной теории, предложенной Nickman и Zoback в 1981 году, данная величина должна быть равна минимальному напряжению в пласте. Однако результаты обработки лабораторных кривых спада давлений получились завышенными. Также, завышенными оказались и экспериментальные значения давлений образования трещин по сравнению с вычисленными.

В ходе данной работы были выявлены некоторые факторы, имеющие влияние образование и развитие трещины гидроразрыва. Одним из таких факторов является возникновение обратного напряжения (back-stress). Это напряжение возникает из-за повышения порового давления в образце при фильтрации жидкости разрыва в пласт. Оно создает дополнительное давление извне на стенки скважины при образовании трещины и на стенки трещины при ее развитии. Это приводит к более раннему закрытию образовавшейся трещины гидроразрыва и завышенным теоретическим значениям как давления закрытия трещины, так и давления ее образования. Было выявлено, что учет обратного напряжения позволяет значительно уменьшить разницу между вычисленными значениями минимальных напряжений и реальных лабораторных значений.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122032900167-1).

## Особенности деформирования и разрушения кровли выработанного пространства в зависимости от его протяженности

---

Трофимов В.А., Шиповский И.Е.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: asas\_2001@mail.ru

По мере развития выработанного пространства напряженно-деформированное состояние вмещающего массива горных пород претерпевает существенные изменения, обусловленные как геометрическими размерами и положением выработок, так и деформационно-прочностными свойствами слагающих массив пород. Известно аналитическое описание формирования и развития напряженно-деформированного состояния, для случая, когда кровля отрабатываемого пласта представлена прочными, упругими породами и сохраняет целостность на всех этапах развития выработанного пространства.

Хотя в отдельных ее частях возникают растягивающие напряжения, но ее прочностные свойства не позволяют ей обрушаться с образованием множества отдельностей. В этом случае кровля (речь идет об основной кровле) плавно опускается на почву или обрушенные породы непосредственной кровли.

Зоны растягивающих напряжений возникают над выработанным пространством, и если максимальная величина растягивающих напряжений в них превышает предел прочности на растяжение, то возможно расслоение пород кровли по трещинам напластования с образованием протяженных зияющих трещин. Хотя исходных трещин напластования чрезвычайно много, но в итоге весь процесс разрушения локализуется в одной магистральной трещине, которая в итоге разгружает весь массив от растягивающих напряжений.

Однако такая ситуация возникает далеко не всегда, и зачастую происходит лавинное обрушение кровли при выполнении определенных критериев прочности для породы кровли. При обрушении в тонком пласте разрыхленная порода полностью заполняет пустоту и начиная с какого-то момента подбучивает кровлю, препятствуя развитию ее дальнейшего обрушения.

Деформационное и прочностное поведение геоматериала оценивается критерием, подобным критерию Друкера - Прагера, согласно которому при достижении предела упругости происходит переход к пластическому течению. При этом упругое поведение геоматериала следует закону Гука, задающему линейное соотношение между девиатором скоростей тензора напряжений и тензором скоростей деформации. Упругое состояние среды в пространстве напряжений ограничено поверхностью предельного состояния, при достижении которого начинается процесс неупругого, пластического деформирования, или разрушения.

Фактически параметры этой поверхности определяются в результате проведения лабораторных, либо натурных экспериментов.

С этой целью для расчетов был использован близкая к конусу Друкера-Прагера поверхность для материала, представлявшего породы кровли (песчаник). При этом пластическая деформация при достижении предела упругости определяется с использованием пластического потенциала.

Постановка задачи в конечном итоге сводилась к постепенному увеличению протяженности выработанного пространства при сохранении величин, характеризующих прочностные свойства кровли и, соответственно, возможные ее разрушения. При расчетах полагалось, что мощность вынимаемого слоя составляет 2м, а протяженность выработанного пространства варьировалась от 40м до 80м. Расчеты для различных прочностных параметров пород кровли позволили выявить триггерный характер обрушения кровли при различных подвиганиях забоя.

Отметим, что в проведенном исследовании основным результатом является выявление того факта, что имеет место скачкообразное изменение состояния всего массива с образованием значительных по размерам областей разрушенного материала в кровле пласта. Очевидно, что размеры разрушенной области зависят помимо прочностных свойств материала, так же от размеров выработанного пространства. Т.е. в данной горнотехнической ситуации реализуется неустойчивый характер деформирования, когда смещения в массиве по мере увеличения протяженности выработанного пространства остаются небольшими, т.е. в пределах упругого деформирования, а при достижении предельной протяженности происходит потеря устойчивости кровли, и она обрушается в значительном масштабе.

# Возможность применения данных о реконструкциях напряжений к структурным горизонтам углеводородных месторождений (на примере модели)

---

**Гордеев Н.А.**

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

e-mail: turistmsu@gmail.com

С каждым годом возрастает актуальность поиска, доразведки, переоценки месторождений углеводородов, так как спрос на сырье поднимается, а известные месторождения исчерпаемы. Нами предложен новый вариант оценки проницаемости пластов. Он работает на качественном уровне, и способен дать предварительную оценку перспективных мест добычи углеводородов. Исследуются дизъюнктивные структуры, которые используются в качестве опорного скелета для получаемых реконструкций локальных стресс-состояний. Сами локальные стресс-состояния получаются при помощи программного обеспечения SimSGM (Гордеев, 2019; Молчанов, 2020), в котором автоматизирован и доработан структурно-геоморфологический метод Л.А. Сим (Сим, 2000). Главные элементы этого метода - разрывные нарушения (разломы, ослабленные зоны, линейные элементы) и мегатрещины (мелкие прямолинейные участки рельефа). По имеющемуся материалу сейсмотомографии, сейсмо-профилей, скважин и литологии строится структурный горизонт, отражающий кровлю или подошву отложений, и чем детальнее будет этот рельеф, тем качественнее будут данные по реконструкции. В нашем случае набор данных по мегатрещинам производится по: а) градиентам высот (долины, понижения); б) по пликативным структурам (находится типичное для складок расположение трещин (Корсаков, 2009)).

После восстановления напряжений проводится сопоставление глубинного поля напряжения на структурном горизонте с тем, что получается на дневной поверхности. Если находится общее поле напряжения, которое удовлетворяет как глубинным, так и поверхностным реконструкциям - мы утверждаем, что нашли современное поле напряжений. Также для верификации полученных реконструкций можно использовать данные о сейсмичности, как регионального, так и локального уровней. В данной работе данные полностью смоделированы, поэтому использовать сейсмичность мы не можем. Однако, если данные о сейсмике не совпадают с данными о реконструкциях, значит возраста реконструкций отражают более раннее напряженное состояние (если речь идет об общем поле напряжений). Если у нас имеются данные о детальной сейсмике, когда можно получить механизм очага землетрясений в пределах одного месторождения - то их уже можно сравнивать с локальными стресс-состояниями.

Далее производится обнаружение зон сжатия и растяжения. Предполагается, что в зонах растяжений будут повышенные добычи и дебиты углеводородов, а в зонах сжатия - наоборот.

Как финал, мы можем получить модель трещиноватости среды, где нам предположительно известны зоны с повышенной трещенной проницаемости пластов.

Работа написана в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Литература:

Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 25–33.

Корсаков А.К. Структурная геология. М.: КДУ. 2009. 328 с.

Молчанов А. Б., Гордеев Н. А. Автоматизация метода реконструкции неотектонических напряжений Л.А. Сим с применением алгоритмов компьютерного зрения // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. № 18. С. 301-304. DOI: 10.31241/FNS.2021.18.056

Сим Л.А. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука, 2000. С. 326-350.

## Инициация разрыва на модельном разломе со сложной структурой контактных пятен

---

Павлов Д.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А.Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: dpav123@mail.ru

Физика очага землетрясения, механика разломов – активно развивающиеся в настоящее время разделы наук о Земле. В немалой степени этому способствует лабораторное моделирование, которое в последнее время получило мощный дополнительный импульс в виде появившихся в США и Японии крупномасштабных экспериментальных установок, задействующих блоки скальной породы довольно крупного размера, длиной от 1 до 4 м. Подобные установки позволяют в деталях рассмотреть процессы зарождения, инициации, распространения, и что особенно важно – остановки разрыва.

Инициация разрыва обычно происходит в области, где жесткость разлома (скорость снижения сопротивления сдвигу) превышает жесткость вмещающего массива. В терминах модели "rate-and-state friction" это соответствует тому, что разрыв обычно начинается в области, заполненной материалом, проявляющим свойство скоростного разупрочнения. В природе подобные области обычно соответствуют напряженным "контактным пятнам" внутри разломов, так называемым "asperities" (выступам), которые, в свою очередь, окружены "разгруженными областями" "barriers" (барьерами) сложенными, обычно, материалами со свойствами скоростного упрочнения.

Настоящая работа представляет результаты, полученные на новой лабораторной установке, которая создана в ИДГ РАН в 2020г. Лабораторная установка представляет собой модель участка активного разлома размером 75 x 12 см, собранную из двух блоков габбро метрового масштаба. Роль контактных пятен играли диски диаметром 10см из цементного раствора, который заливался в щель между блоками габбро шириной 4мм. Разгруженные области (промежутки между цементными дисками) заполнялись сухим кварцевым песком. Количество контактных пятен (дисков) в разных экспериментах варьировалось от одного до трёх. Эксперименты по относительному сдвигу блоков габбро проводились при нормальном напряжении до 2 МПа.

Были проведены две серии экспериментов со "слабыми" дисками (соотношение цемента к песку 1:10) и "прочными" дисками (соотношение цемента к песку 1:3). В экспериментах регистрировалось относительное смещение блоков габбро в диапазоне частот 0-5000 Гц и акустическая эмиссия, сопровождающая это смещение, в диапазоне частот 1-80000 Гц. Записывались только подготовка срыва и сам срыв.

Результаты показали, что срывы слабых дисков можно рассматривать как медленные события, в то время как срывы прочных дисков соответствуют быстрым динамическим срывам. Это же подтвердили и данные акустической эмиссии.



## Кластеризация данных акустической эмиссии для гранулированных сред и шахтной микросейсмичности

---

**Морозова К.Г.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: morozovaxg@gmail.com

Акустоэмиссионные методы являются широко распространенным методом неразрушающего контроля природных объектов и инженерных сооружений. Данные акустической эмиссии позволяют исследовать механику формирования макротрещин и определить закономерности их пространственной локализации. Детектированные импульсы при разрушении могут быть классифицированы по их типу генерации с помощью параметров, описывающих их волновую форму – скорости нарастания амплитуды  $RA$  и скорости счета  $AЭ AF$ . В работе представлен новый подход к классификации импульсов акустической эмиссии, полученный в результате экспериментов по сдвиговой деформации нагруженного гранулированного материала. Новый инструмент типизации импульсов является модификацией  $RA/AF$  алгоритма и основывается на кластеризации методом  $k$ -средних по параметрам, описывающим волновую форму выделенных импульсов  $AЭ$ : величина нарастания амплитуды  $RA$ , скорость счета суммарной  $AЭ AF$  и параметр волновой формы  $WI$ . Дополнительный параметр  $WI$  характеризует огибающую импульса  $AЭ$  и определяется как отношение времени нарастания импульса к времени затухания. Применение метода позволяет выделять ансамбли импульсов  $AЭ$ , для которых характерны различные скейлинговые соотношения и различные механизмы инициирования. Алгоритм был апробирован на данных шахтной микросейсмичности, где он также показал высокую информативность. Среди выделенных кластеров наблюдаются отличия в средней величине излучательной эффективности  $ES/M0$  в соотношении между скалярным сейсмическим моментом  $M0$  и угловой частотой  $f0$  источника, что указывает на разную величину сброса напряжений. Таким образом, предложенный метод анализа может быть использован как для лабораторных так и для натуральных данных.

## Особенности динамики сейсмической активности в Северной и Южной Калифорнии

---

Зотов О.Д. (1, 2), Завьялов А.Д. (1), Клайн Б.И. (2), Гульельми А.В. (1)

(1) Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

(2) Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок, Россия

e-mail: ozotov@inbox.ru

В работе сделана попытка ответить на вопрос - можно ли примыкающие территориально друг к другу сейсмоактивные регионы считать взаимосвязанными. Используются данные о землетрясениях двух региональных каталогов - Северной и Южной Калифорнии с 1984 по 2007 г., созданные в двух независимых сейсмологических организациях. Анализировались ряды суточных сумм землетрясений и среднесуточных магнитуд, сформированные из указанных каталогов без селекции по какому-либо параметру.

При анализе временных рядов использовался показатель Херста, характеризующий фрактальную размерность хаотического процесса. Заметим, что показатель Херста, вычисленный по всему интервалу времени (с 1984 по 2007 г) одинаков для обоих регионов:  $H=0.86$ . При дальнейшем рассмотрении была обнаружена антикорреляция между длиннопериодными (несколько десятков лет) вариациями накопленного отклонения от среднего показателя Херста, характеризующего хаотические свойства сейсмической активности в Северной и Южной Калифорнии. Антикорреляция наблюдается также и в динамике флуктуаций среднесуточных значений магнитуды. В нормированном кросс-вейвлет спектре отмечены два временных интервала когерентности в динамике сейсмической активности в диапазоне периодов 8-16 месяцев и с периодом 64 месяца.

В динамике показателя Херста и нормированном кросс-вейвлет спектре наблюдаются особенности в окрестности двух сильных землетрясений в Южной Калифорнии - землетрясений Ландерс (28.06.1992,  $M=7.3$ ) и Гектор Майн (16.10.1999,  $M=7.1$ ).

Таким образом, найдены аргументы в пользу гипотезы о связи сейсмических процессов в соседних регионах - Северная и Южная Калифорния.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программ государственных заданий Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

## К вопросу о влиянии упруго-анизотропных параметров твердых сред на их геометрическую форму на примере гальки в районе губы Завалишина (экспериментальные данные)

Ковалевский М.В., Тришина О.М., Горбацевич Ф.Ф.

Геологические институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», г. Апатиты, Россия

e-mail: mikle\_kov@mail.ru

На северном побережье Кольского полуострова, омываемом Баренцевым морем, наблюдаются белокаменные пляжи с уникальной яйцевидной галькой. Особенно они распространены на участке от острова Малый Олений до острова Малый Зеленецкий, где на расстоянии 40 км насчитывается порядка 70 каменных пляжей.

Благодаря взаимодействию пород Балтийского щита и прибрежных волн, на берегу Баренцева моря довольно распространены неглубокие каньоны и редкие бухты вдоль рек. Каньоны представляют собой корытообразные углубления в береговой части моря, борта и ложе которых сложены красными породами, вероятно, калиевыми гранитами и эндербитами. Валунно-галечный материал, образующий каменные пляжи, скапливается в ложе каньонов и состоит из обломков пород в основном светлого цвета, вероятно, плагиогранитов, гнейсогранитов, тоналитов и диорит-плагиогранитов. Среди гальки с высокой окатанностью выделяются особые образования яйцевидной формы. На некоторых пляжах они составляют около 30% валунно-галечного материала. Размеры такой гальки варьируют от 5 см до 1 м, при этом форма остается близка к идеальной геометрии яйца (соотношение длинной и короткой оси 5:4 и 9:5). С чем связана яйцевидная морфология гальки до сих пор неясно.

В данной статье приведены первые экспериментальные исследования упруго-анизотропных свойств пород, слагающих яйцевидные образования на побережье Баренцева моря, с целью установить наличие или отсутствие взаимосвязи этих свойств с морфологией гальки.

Для определения связи морфологии гальки с упруго-анизотропными свойствами слагающих пород из образцов были изготовлены 10 проб пород в форме куба с ребром размером 2.1-2.6 см. Определен минеральный состав пород, который представлен кварцевыми диоритами и плагиогранитами. Плотность пород определяли методом Архимеда. С использованием акустополаризационного метода построены акустополариграммы образцов. На основе данных акустополариграмм определены направления в которых рассчитаны скорости распространения продольных (VPR) и поперечных (VSR) волн. Скоростные данные представлены в виде квазиматрицы скоростей. Определены показатели анизотропии по продольным и поперечным волнам.

Анализ результатов определений скорости распространения продольных и поперечных волн показывает, что каждая из скоростных характеристик пород содержит определенную (детерминированную) и некоторую случайную (флуктуационную) составляющие. Среднее значение плотности пород составляет  $2,68 \pm 0,08$  г/см<sup>3</sup>. Средние показатели скорости продольных волн (VPR) -  $5,24 \pm 0,06$  км/с, поперечных (VSR) –  $3,18 \pm 0,07$  км/с. Анализ коэффициентов упругости не показывает существенных значений, что позволяет сделать нам вывод о том, что породы сложены достаточно однородно и механические напряжения в них по разным направлениям сохраняются.

Анализ акустополариграмм совместно с анализом скоростных соотношений позволяет отнести все образцы к орторомбическому типу упругой симметрии. Как известно данный тип симметрии состоит из системы двух взаимноперпендикулярных плоскостей симметрии. В плоскости более сильной анизотропии наблюдаются максимальные значения VPR, VSR более слабой – минимальные. При этом если полиминеральная порода формируется в поле напряжений сжатия,

то согласно работам (Беликов, Кожевников, Robin) максимальной ориентировке силы сжатия отвечает минимальные значения скорости VPR или константы упругости С. Для определения ориентировки компонентов напряжений были рассчитаны модули Юнга (Е) отдельно для каждой породы по трем направлениям кубического образца. Из полученных результатов видно, что поле напряжений в породах сформировалось одинаково по двум направлениям и в одном направлении определились большие значения. Геометрически это представляет собою эллипс. Подобные условия сформированных напряжений соответствуют формированию яйцеподобной формы гальки.

Таким образом, изучение петрофизических свойств яйцевидной гальки Баренцева моря показало наличие связи упруго-анизотропных свойств слагающего вещества с морфологией. Это позволяет полагать, что галечник образован из массива горных пород, первоначально находящегося под действием неравносторонних палеосил.

# Кинетика нагрева углей склонных и не склонных к самовозгоранию

Захаров В.Н., Малинникова О.Н., Докучаева А.И.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: ana-anastasia2015@yandex.ru

Термогравиметрический метод анализа (ТГА) отражает кинетику процессов, происходящих при нагревании образцов угля, и подходит для изучения низкотемпературного окисления углей для определения склонности углей к самопроизвольному нагреву и самовозгоранию, а также вычисления кинетических параметров на стадии окисления.

Известно, что по изменению массы образцов угля можно судить о сорбции кислорода углем и о явлениях, происходящих в процессе трансформации угольного вещества с ростом температуры. Увеличение массы угля в диапазоне температур 100-250 °С, превышающих температуру испарения влаги, но ниже температуры активного разложения угля, интерпретируют как сорбцию кислорода с образованием угольно-кислородных комплексов, что может быть применено при оценке склонности угля к самовозгоранию по его химической активности к кислороду.

На сегодняшний день нет экспериментального термогравиметрического параметра, который смог бы достоверно охарактеризовать склонность угля к самопроизвольному нагреву. Это связано с противоречивостью результатов, поскольку величины, характеризующие склонность углей к самовозгоранию: максимальный прирост массы ( $M$ ), температура самонагрева образца ( $T_{нагр}$ ) и температура воспламенения ( $T_{кр}$ ) – меняются в зависимости от выбранных фракции и массы навески угля, скорости нагрева камеры, а также от вида и скорости подачи газа в камеру анализатора.

Нами проведены опыты по выбору скорости нагрева образцов углей в выбранном диапазоне температур. Было исследовано поведение образцов углей из Печерского угольного бассейна, склонных и не склонных к самовозгоранию, при скоростях нагрева 3, 5 и 10 °С/мин с постоянной скоростью нагрева до 1000 °С.

В результате эксперимента были выявлены следующие закономерности.

Скорость нагрева образца оказывает существенное влияние на все показатели склонности угля к самовозгораемости и на критерии разделения углей на категории склонных и не склонных к самовозгоранию.

С увеличением скорости нагрева количество сорбированного кислорода (без сгорания)  $M$  уменьшается.

Для образцов углей, не склонных к самовозгоранию, величина  $M$  не превышает значения 0,6 % при скорости нагрева 3 °С/мин, 0,2 % при 5 °С/мин и при скорости нагрева 10 °С/мин составляет сотые доли процента.

Для образцов углей, склонных к самовозгоранию, величина  $M$  при скоростях нагрева 3, 5 и 10 °С/мин соответственно равна или больше 1, 0,6 и 0,4 % от исходной массы образца.

Для образцов углей, склонных к самовозгоранию, средняя температура начала реакции ( $T_{нач}$ ) составляет 140, 162 и 173 °С, при скорости нагрева 3, 5 и 10 °С/мин; для не склонных к самовозгоранию реакция окисления начинается в среднем при 180, 199 и 205 °С соответственно.

## Пространственное распределение молниевых разрядов и атмосферно-литосферные связи

---

**Ягова Н.В. (1), Орлова Н.А. (2), Щекотов А.Ю. (1), Каранин А.В. (3)**

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук, Москва, Россия

(3) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Горно-Алтайский государственный университет Горно-Алтайск, Россия

e-mail: nyagova@yandex.ru

Молниевый разряд является важным звеном межгеосферных и солнечно-земных связей. Частота появления разрядов модулируется солнечной активностью, а пространственное распределение влияет на параметры волновода Земля-ионосфера и ионосферного альвеновского резонатора (ИАР). Молниевый разряд является источником электромагнитного излучения в широком диапазоне частот, тепловых и механических возмущений, что определяет его вклад в литосферные процессы от образования новых минералов до сейсмо-ионосферных явлений.

Вместе с тем, связь литосферных процессов и пространственного распределения молниевых разрядов на локальных и региональных масштабах изучена недостаточно. Для процессов с большим выходом энергии, таких как землетрясения, перераспределение молниевых разрядов может служить индикатором будущего землетрясения, а для менее интенсивных, таких как оползни – триггером.

В работе исследуются пространственные распределения молниевых разрядов и их временные вариации в европейской части России и на Дальнем Востоке и анализируются их связи с геолого-географическими и тектоническими параметрами среды и сейсмической активностью. Для анализа молниевых разрядов используются многолетние данные регистрации молниевых разрядов с 2010 по 2016 годы, собранные в базах мировых сетей WWLLN и ENGLN.

Для несейсмических (платформенных) районов выявлено, что многолетние максимумы грозовой активности ассоциированы с зонами поднятий фундамента и границами блоков первого порядка. Для сейсмоактивных зон показаны случаи пресеismicкого перераспределения грозовых разрядов. Обсуждаются возможный вклад такого перераспределения в наблюдаемые сейсмoeлектромагнитные эффекты в УНЧ-КНЧ диапазонах частот.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 22-17-00125

## Оценка квантилей максимальной магнитуды в будущем интервале времени (на примере Байкальской рифтовой зоны)

Писаренко В.Ф. (1), Ружич В.В. (3), Скоркина А.А. (1, 2), Левина Е.А. (3)

(1) Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

(3) Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

e-mail: anna@mitp.ru

Изучению структуры сейсмического поля и, в частности, определению максимальной возможной региональной магнитуды, в сейсмоактивных регионах в последнее время уделяется большое внимание [Pisarenko et al., 2010; Kijko, Singh, 2011]. Ранее для территории Байкальской рифтовой зоны была выполнена работа по оценке максимально возможной региональной магнитуды [Ружич и др., 1998]. В настоящей работе применены новые методы к каталогу землетрясений, увеличенного, соответственно, на интервал в 1999-2021 гг., с учетом таких сильных землетрясений как Култукское (27 августа 2008 года,  $M = 6.3$ ) и Хубсугульское (12 января 2021,  $M = 6.8$ ). В работе мы использовали каталог магнитуд Байкальского филиала Единой геофизической службы РАН (БФ ФИЦ ЕГС РАН, [seis-bykl.ru](http://seis-bykl.ru)) за период 1963–2021 год;  $48.0 \leq \text{широта} \leq 58.93$ ;  $96.0 \leq \text{долгота} \leq 122.0$ ;  $2.6 \leq M \leq 8.2$ .

Известно, что статистические оценки параметра  $M_{\max}$  часто являются неустойчивыми и неробастными. Такой вывод можно сделать для ситуаций, когда в диапазоне сильных землетрясений нет достаточно большого числа наблюдений, позволяющих надежно оценить хвост распределения магнитуд. С учетом этого были выдвинуты предложения характеризовать сейсмичность в диапазоне сильных землетрясений с помощью физически понятной и статистически корректной случайной величины – максимальной магнитуды землетрясения, которое произойдет в будущем интервале времени  $T$  (в данном регионе). Эту случайную величину можно характеризовать с помощью ее функции распределения или плотности, но удобнее использовать обратную функцию по отношению к функции распределения – функцию квантилей  $Q_q(T)$  с переменным уровнем  $q$ . Функция распределения и функция квантилей для непрерывного распределения однозначно определяют друг друга. Заметим, что квантиль  $Q_q(T)$  можно рассматривать как верхнюю доверительную границу для будущей максимальной в интервале  $T$  магнитуды с уровнем доверия  $q$  [Писаренко и др., 2022].

В работе показано, что оценка максимального правдоподобия для параметра  $M_{\max}$  для всей зоны БРЗ велика, большие значения максимальных магнитуд случаются относительно редко: максимальные магнитуды более 8.5 с вероятностью 0.95 происходят на больших интервалах времени  $T \approx 300$  лет или более. Поэтому с позиций оценки сейсмического риска параметр  $M_{\max}$  является не вполне адекватным. 95%-ная верхняя доверительная граница для максимального землетрясения существенным образом зависит от того, на какой интервал времени  $T$  мы ходим предсказать это максимальное землетрясение. Если нас интересует  $T = 10$  лет, то прогноз не превышает  $M_{\max} = 7.1$ . Но если взять большие значения  $T$  порядка 300 лет и больше, то можем получить прогноз  $M_{\max} \approx 8.0$  и более. По этой причине, по мнению авторов, для проблем оценки сейсмического риска квантили  $Q_q(T)$  гораздо адекватнее, чем параметр  $M_{\max}$ .

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 20-05-00433 (соавторы В.Ф. Писаренко, А.А. Скоркина), и в рамках базового бюджетного проекта "Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии № FWEF-2021-0009 (соавторы В.В. Ружич, Е.А. Левина).

## Учёт пространственной неоднородности параметров сейсмического режима для построения надёжных оценок сейсмической опасности

---

**Павленко В.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: pavlenko.vasily@gmail.com

В работе сравниваются два подхода к описанию диффузной (распределённой по площади) сейсмичности при построении карт сейсмической опасности вероятностными методами. Сравниваются традиционный подход, при котором возникновение землетрясений считается равновероятным в любой точке площадной зоны возможных очагов землетрясений (ВОЗ) и подход, основанный на сглаживании наблюдаемой сейсмичности. В расчётах использован метод вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) Корнелла-МакГуайра. Сравнение выполнено на примере окрестностей озера Байкал. В работе использован каталог землетрясений Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН за весь период инструментальных наблюдений. По каталогу проанализированы пространственно-временные вариации магнитуды представительной регистрации землетрясений, построены пространственные распределения параметров сейсмичности – кумулятивной частоты возникновения землетрясений ( $\lambda$ ), наклона графика повторяемости землетрясений (b-value) и максимальной магнитуды землетрясений ( $M_{max}$ ) для периодов равномерной регистрации. Затем построены распределения этих параметров для всего периода инструментальных наблюдений. Таким образом получены оценки значений параметров, характеризующие сейсмический режим территории в целом. Параметры сейсмичности местных линеаментов взяты из базы данных карт ОСР-2015. Для оценки сейсмических воздействий с помощью метода стохастического моделирования акселерограмм местных землетрясений сгенерирован набор акселерограмм в широком диапазоне магнитуд и расстояний и построено уравнение прогноза движений грунта (УПДГ), описывающее зависимость пиковых ускорений (PGA) от магнитуды и расстояния. Построены карты сейсмической опасности для периодов повторяемости 475, 975 и 4975 лет. Полученные карты демонстрируют выраженный эффект двух подходов к описанию диффузной сейсмичности.



## Условия инициации трещины на границе пороупругой среды с непроницаемым препятствием

---

Юдочкин Н.А. (1), Беляков Г.В. (1), Таирова А.А. (1, 2)

(1) Институт Динамики Геосфер им. М.А. Садовского, Москва, Российская Федерация

(2) Московский физико-технический институт, Москва, Россия

e-mail: rood818181@gmail.com

Горные породы, вмещающие в себя жидкость или газ по генезису происхождения, относят к осадочным. Двумя основными чертами осадочных горных пород являются пористость и наличие неоднородностей. При воздействии фильтрации жидкости происходит изменение напряженно-деформированного состояния пористого пласта, в результате чего возможно возникновение трещин. При инициации трещины одним из основных критериев является условие, когда сдвиговые напряжения превосходят прочность породы. Более существенно напряженно-деформированное состояние изменяется на границе упругой проницаемой среды и менее проницаемого препятствия в результате взаимодействия вязкой жидкости, проходящей через пористый скелет. Для исследования образования и развития трещины в осадочных породах рассмотрена модель пороупругой среды, содержащая непроницаемые препятствия.

В представленной работе методом физического моделирования исследовано влияние фильтрации жидкости на процесс развития трещины в неоднородной пористой среде. Для этого была создана экспериментальная установка, основная часть которой состояла из ячейки Хеле-Шоу, заполненной пороупругой средой. Давление жидкости регистрировалось на входе в ячейку. Эксперименты проводились при различных геометрических параметрах неоднородностей и их расположения. Картина процессов, происходящих при фильтрации вязкой жидкости в скелете, регистрировалась в режиме реального времени. Оптически прозрачная модель пористой среды позволила оценить напряженно-деформированное состояние скелета при воздействии вязкой жидкости. Выявлены условия образования канала при разрушении пористой среды в результате сдвигового напряжения на границе пористой среды и непроницаемого препятствия. В ходе проведения экспериментов было рассмотрено влияние расположения неоднородности на распространение упругой волны. По данным визуализации экспериментов была получена скорость фронта фильтрации (фильтрационной волны), в результате чего было оценено изменение проницаемости по времени.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122032900167-1).

# Метод реконструкции напряженного состояния углепородного массива: решение обратных задач по данным сейсмической томографии

---

**Назарова Л.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

e-mail: larisa.a.nazarova@mail.ru

Диагностика и прогноз состояния геотехнических объектов различного масштабного уровня, геомеханическое обоснование технологий отработки месторождений полезных ископаемых, контроль траектории ствола скважины при наклонном, горизонтальном и многозабойном бурении – решение этих и многих других проблем требует оценки поля напряжений при развитии горных работ.

Теоретически обоснован и на реальном объекте апробирован метод, позволяющий по комплексу геотехнической, геомеханической и геофизической информации реконструировать напряженно-деформированное состояние породного массива при отработке месторождений твердых полезных ископаемых. Подход включает: лабораторные эксперименты по трехосному нагружению породных образцов; пассивную томографию обрабатываемого участка месторождения с использованием данных штатной системы наблюдений и импульсов от динамических событий (с превышающей фоновый уровень энергией) в качестве зондирующих сигналов; формулировку и решение обратной коэффициентной задачи определения граничных условий для геомеханической модели рассматриваемого объекта, входными данными для которой является восстановленное в результате томографии поле скоростей в освещенной части обрабатываемого участка.

Выполнены испытания угольных образцов по схеме Кармана, аппроксимация результатов позволила получить аналитические зависимости скорости продольных волн от осевого напряжения и бокового давления.

Численные эксперименты, проведенные для типичной конфигурации подземного пространства при конвейерной отработке пластов шахт ОАО “Воркутауголь”, показали, что при принятой на объекте конфигурации системы наблюдений для однозначной разрешимости сформулированной обратной задачи необходима хорошая освещенность тех участков пласта, где имеет место повышенный пространственный градиент напряжений, а также наличие регулярной составляющей в диапазоне частот порядка сотен герц в зондирующем сигнале, генерируемом выемочным комбайном и/или оборудованием для механизации очистных работ.

Предложенный подход позволяет в рамках геомеханической модели осуществлять мониторинг напряженно-деформированного состояния породного массива при развитии горных работ.

Работа выполнена в рамках программы НИР, номер государственной регистрации 121062200075-4.

## Солнечные протонные события как триггер усиления возмущенности верхней ионосферы

---

Клименко М.В. (1, 2), Клименко В.В. (1, 2), Бессараб Ф.С. (1, 2),  
Суходолов Т.В. (1, 2), Розанов Е.В. (1, 2)

(1) Калининградский Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук, Калининград, Россия

(2) федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет Санкт-Петербург, Россия

e-mail: maksim.klimenko@mail.ru

В данной работе представлены результаты исследования отклика параметров системы термофера-ионосфера на Солнечные Протонные События (СПС) и высыпания магнитосферных протонов. Известно, что основная часть энергии протонов поглощается значительно ниже F и E областей ионосферы, поэтому и прямой эффект от СПС в параметрах ионосферы должен быть невелик. К тому же протонные события и значительные высыпания магнитосферных протонов происходят на фоне геомагнитных возмущений, которые значительно воздействует на ионосферу и тем самым маскируют ионосферные эффекты солнечных и магнитосферных протонов в данных наблюдений. Эффективное исследование подобных явлений возможно лишь с использованием самосогласованных моделей системы атмосфера-ионосфера. Наше исследование было выполнено с помощью недавно созданной модели всей атмосферы EAGLE (Entire Atmosphere GLobal model). Характеристики потоков солнечных протонов и скорости ионизации от них рассчитывались с помощью модели AIMOS (Atmospheric Ionization Module Osnabrück). Численные эксперименты проводились для января 2005 г. и сентября 2017 г. во время которых наблюдались СПС типа Ground Level Enhancement (GLE). Причем, СПС 20 января 2005 года было самым мощным за последние более чем 50 лет, произошедших после GLE 23 февраля 1956 г. В процессе одного из вариантов расчетов изменялись характеристики только протонных потоков, все остальные входные параметры модели EAGLE, в том числе параметры электронных высыпаний, соответствовали спокойным условиям. Несмотря на относительную прозрачность верхней атмосферы для протонов высоких энергий, в численных экспериментах был получен ионосферный отклик на усиление протонных высыпаний из хвоста магнитосферы и СПС. В E области ионосферы максимальное увеличение электронной концентрации локализовано вблизи полюсов и ограничено широтными кругами  $\pm 60^\circ$ , а на высотах F2 слоя ионосферы положительные возмущения формируются в низкоширотной области. Анализ полученных модельных результатов показал, что изменения в F2 слое ионосферы произошли вследствие генерации динамических процессов в мезосфере и нижней термосфере, которые вызвали направленный к экватору перенос атомарного кислорода, и, в конечном итоге, рост электронной концентрации в F области ионосферы. Мы показали, что на фазе восстановления после СПС полное электронное содержание и плотность электронов в области F и в верхней ионосфере/плазмосфере на низких и средних широтах растет в связи с увеличением концентрации атомного кислорода. Подобный положительный ионосферный эффект последствия существует и после геомагнитных бурь и стратосферных потеплений. Основные отличия возмущений NmF2 и ПЭС в одном регионе связаны в основном с возмущениями электронной температуры, оказывающими существенное влияние на возмущения полного электронного содержания.

Работа выполнена в Лаборатории исследований озонового слоя и верхних слоев атмосферы СПбГУ при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

(соглашение № 075-15-2021-583). Ансамблевые расчеты и их анализ проводился при финансовой поддержке гранта РНФ №21-17-00208.

# Повышение чувствительности наземных сетей сейсмического мониторинга разработки месторождений углеводородов: теоретические исследования и полевые эксперименты

---

Дергач П.А. (1, 2), Дучков А.А. (1, 2), Яскевич С.В. (1, 2)

(1) Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), Новосибирск, Россия

e-mail: dergachpa@ipgg.sbras.ru

Процесс длительной разработки месторождений углеводородов зачастую сопровождается проявлением повышенной техногенной и индуцированной сейсмичности, приводящей к различным негативным последствиям на их территории. Из наиболее значимых последствий можно выделить: нарушения обсадных колонн скважин и коммуникаций; повреждение зданий, трубопроводов и прочих объектов инфраструктуры месторождения. Все это наносит значительный экономический ущерб. Необходимо отметить и возможный экологический ущерб, в частности загрязнение среды, связанное с возможным разливом нефтепродуктов и т.д.

Одним из методов удаленного контроля за геодинамической обстановкой является сейсмический мониторинг, который позволяет по записям сейсмических колебаний определять координаты и энергию сейсмических событий в пределах месторождения. Существует два основных типа систем наблюдения: наземная, состоящая из отдельных сейсмологических пунктов, расположенных на земной поверхности, и скважинная, состоящая из приемных антенн, установленных на глубине нескольких километров, в непосредственной близости от сейсмоактивной зоны. Записи с наземных пунктов, как правило характеризуются крайне высоким уровнем техногенных шумов, связанных с работой техники на территории месторождения. Скважинные системы, напротив, характеризуются высоким соотношением сигнал/шум, по причине близости сейсмометров к гипоцентрам регистрируемых землетрясений и удаленности от источников техногенных шумов. Однако препятствием для их повсеместного применения является крайне высокая стоимость бурения глубоких скважин, а также установки и обслуживания оборудования.

В данной работе приводятся результаты теоретических исследований зависимости чувствительности наземной сети сейсмологического мониторинга от количества и пространственного распределения пунктов наблюдения на территории месторождения, а также полевых экспериментов по заглаблению сейсмометров на глубины до 100 метров.

Для теоретических исследований использовались реальные записи наземной сейсмологической сети, функционирующей на действующем нефтяном месторождении. В рамках полевого эксперимента, сейсмометры со всех пунктов наблюдения были установлены на дно скважин глубиной до 100 метров. Оптимальная глубина определялась в ходе рекогносцировочных работ, в рамках которых производились записи на различных глубинах. Некоторое время после установки, запись велась параллельно двумя системами: наземной и заглабленной.

В результате теоретических исследований был предложен способ оценки чувствительности сети на основании пространственного распределения пунктов наблюдения с соответствующими уровнями сейсмических шумов. В результате полевого эксперимента было продемонстрировано, что установка сейсмометров в скважины глубиной около 80 метров обеспечило прирост чувствительности по магнитуде порядка 1 (Ml), а количество регистрируемых локальных землетрясений увеличилось приблизительно в 10 раз. Данный результат хорошо согласуется с теорией [1].

Литература

Aki K., Richards P.G. (1980). Quantitative Seismology: Theory and Methods.

## Влияние геомагнитных возмущений на рост сцинтилляций сигналов ГНСС на авроральных широтах

---

Белаховский В.Б., Джин Я., Милош В., Пильгаев С.В., Будников П.А.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт»,  
Апатиты, Россия

e-mail: belakhov@mail.ru

В работе проведен анализ воздействия различных типов геомагнитных возмущений на резкий рост фазовых и амплитудных сцинтилляций сигналов глобальных навигационных спутников систем (ГНСС) GPS, ГЛОНАСС с использованием геофизических наблюдений в Скандинавии и на Кольском полуострове.

Рассмотрены геомагнитные возмущения, связанные с приходом межпланетной ударной волны, суббури, Pc5 пульсации. Для регистрации сигналов ГНСС использованы данные приемника Septentrio PolaRx5 в городе Апатиты, данные GPS приемника NovAtel на станции Шиботн (Skibotn, Норвегия). Были проанализированы данные наблюдений за 2018-2021 года. Для регистрации ионосферных возмущений в E и F-областях использованы данные радаров VHF, UHF EISCAT в Тромсе. Регистрация ионосферной конвекции проводилась с помощью радара SuperDARN в Hankasalmi. Оптические наблюдения полярных сияний в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм также использованы для регистрации различных ионосферных возмущений. Для регистрации ионосферных возмущений на Кольском полуострове использованы данные ЛЧМ ионозонда ПГИ, работающего в квазивертикальном режиме.

Анализ показывает, что в большинстве случаев заметный рост фазовых сцинтилляций ( $\sigma\phi > 1$ ) происходит во время ночных или вечерних суббурь. Но во время магнитных бурь фазовые GPS сцинтилляции на дневной стороне имеют вполне сравнимые значения. Не обнаружено роста амплитудных GPS сцинтилляций во время рассмотренных событий. Обсуждаются механизмы появления GPS сцинтилляций во время различных типов ионосферных возмущений на авроральных широтах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-77-10018 (Белаховский В.Б.).

## Мультиплексные глубокофокусные землетрясения из района Гиндукуша

---

Соколова И.Н.

Филиал “Институт геофизических исследований” РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

e-mail: sokolova.inessa@mail.ru

При анализе волновой картины сильных глубокофокусных землетрясений из района Гиндукуша было замечено, что большое количество таких землетрясений имеет сложную природу, состоит из нескольких землетрясений, разделенных промежутками времени от 3 до 10 с. Например, такую особенность имели два сильнейших землетрясения за последние 20 лет: 3 марта 2002 с  $M_w=7.4$  и 26 октября 2015 г. с  $M_w=7.5$ . В обоих случаях, у первого землетрясения энергия была значительно меньше основного толчка. Многие Международные и региональные сейсмологические Центры провели оперативную обработку землетрясения 26 октября 2015 г. некорректно, приняв вступление Р-волны первого события за вступление Р-волны основного толчка, в связи с этим были неверно определены такие параметры землетрясения как время в очаге, координаты эпицентра. Международный Центр данных (IDC) не корректно определил  $m_b$ . Окончательная обработка Геологической службы США (USGS), Международного сейсмологического Центра (ISC) и Казахстанского Национального Центра данных ИГИ НЯЦ РК (KNDC) включает как обработку основного толчка, так и первого события. Казахстанские станции зарегистрировали событие в диапазоне эпицентральных расстояний от 740 до 1860 км. В работе исследована структура короткопериодных волновых полей таких землетрясений на основе анализа записей малоапертурных сейсмических групп, расположенных на территории Казахстана (Каратау, Маканчи, Акбулак), входящих в сеть мониторинга ИГИ НЯЦ РК. Даны рекомендации для корректной сейсмической обработки таких событий. Предложена гипотеза формирования сложных очагов сильных Гиндукушских глубокофокусных землетрясений.

# Построение геодинамических моделей формирования напряжённого состояния земной коры кавказского региона

---

Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: dsm@ifz.ru

В работе представлена серия геодинамических численных моделей формирования напряжённо-деформированного состояния литосферы. Исследуется вопрос об геодинамических источниках деформации и формирования напряжённо-деформированного состояния литосферы Кавказского орогена, а также окружающих его структур (Куринско-Рионская впадина, юг Скифской плиты, Малый Кавказ). Целью исследования является не точное воспроизведение структуры орогена из некоторой начальной модели, а, в большей степени, исследование поля напряжений в литосфере орогенов и соотнесение с тектонофизическими данными об их напряжённом состоянии.

Для Кавказского региона моделирование проводилось по численной методике, разработанной Уилкинсом для исследования упругопластических тел [1] и усовершенствованной Ю.П. Стефановым [2] для применения в геомеханике. Особенности данного подхода следующие: применяется явная конечно-разностная схема, причём уравнения движения записываются именно в динамической форме с сохранением инерционного члена как для реальных динамических задач. Каждое воздействие на систему рассматривается в качестве переходного процесса, для которого вводится эффективное «искусственное» время, обычно пропорциональное времени пробега  $r$ -волны через всю модель. В алгоритм вводятся искусственные вязкости, которые подбираются индивидуально для каждой задачи таким образом, чтобы по истечению эффективного промежутка времени упругие волны, вызванные воздействием, затухли. Таким образом моделируются квазистатические процессы. Более подробно методика моделирования и процесс создания цифровой сейсмо-плотностной и геомеханической модели по данной методике описан в работе [3].

На основе созданных моделей была проведена серия расчётов. Для каждого профиля Кавказского региона и для модели литосферы Центральноазиатских орогенов были рассчитаны поля напряжений для каждого геодинамического фактора, рассматриваемого в данном исследовании (мелкомасштабная астеносферная конвекция, давление со стороны соседних участков литосферных плит, влияние эрозии). Каждое рассчитанное поле напряжений в рамках решения обратной задачи геодинамики сверялось с исходными тектонофизическими данными. Тип нагружения «горизонтальное сжатие и эрозионное воздействие» для Кавказского орогена был определён как наиболее соответствующий природным данным о напряжённом состоянии.

Литература:

1. Уилкинс М.Л. Расчёт упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. 1967. М.: Мир. С. 212-263.
2. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластических материалов // Физ. мезомех. 2005. Т. 8. - № 3. С. 129-142.
3. Ребецкий Ю.Л., Погорелов В.В., Мягков Д.С., Ермаков В.А. О генезисе напряжений в коре островной дуги по результатам численного моделирования // Вестник КРАУНЦ. 2018. № 3. С. 54-73.



# Моделирование влияния малых тангенциальных гравитационных сил на глобальное поле напряжений

---

Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: dsm@ifz.ru

Поиск всей совокупности сил, ответственных за движение литосферных плит, является важной задачей современной глобальной геодинамики. При изучении различных геодинамических факторов, ответственных за формирование надлитостатических напряжений в литосфере в последнее время уделяется много внимания уделяется форме подошвы литосферы как поверхности, чьё текущее положение, за вычетом изостатической составляющей, связано с течениями в астеносфере и верхней мантии. В некоторых работах рассматривается отдельно вопрос о формировании тангенциальных сил на подошве мантии [1]. Одним из источников дополнительных напряжений в литосфере, не связанных непосредственно с мантийной конвекцией, можно также рассматривать влияние формы физической поверхности Земли (ФПЗ), а именно – дополнительные малые тангенциальные гравитационные силы, которые возникают в поле силы тяжести за счёт отличия ФПЗ от поверхности геоида. Данное отличие как правило рассматривают как несущественное в контексте формирования глобального поля напряжений, однако согласно результатам исследований, часть которых представлена в данной работе, амплитуды связанных с рассматриваемыми тангенциальными силами напряжений могут достигать первый МПа, что на больших временных отрезках может давать заметный вклад в общую картину глобальной тектоники. Более подробное описание этого исследования представлено в работе [2]. В работе были использованы детальные карты рельефа (от  $0.5^\circ$  до  $5'$ ) и геоид из модели EGM 96. В качестве основного исследуемого параметра рассматривался угол отвесной линии (УОЛ). На основе полученных значений УОЛ далее рассчитывались величины генерируемых в литосфере напряжений. Для расчёта распределения связанных с отклонением формы ФПЗ от геоида УОЛ использовался аппарат сферических функций, позволяющий получить нужный масштаб усреднения. Получены амплитуды тангенциальных массовых сил для каждой точки поверхности Земли, показаны силы, действующие на отдельные плиты.

Показано, что тангенциальные массовые силы могут создавать достаточно существенные по амплитуде нормальные горизонтальные напряжения уровня 10 МПа и выше. В работе [2] обсуждается проблема того, что при интегрировании по глубине для литосферы в целом максимальные касательные напряжения могут превышать значения в первые десятые доли МПа и, поэтому, рассматриваемые тангенциальные массовые силы могут являться самостоятельным источником движения плит. Для отдельных плит, таких как Амурская или Охотская, этот фактор особенно существенен.

Литература:

1. Doglioni C., Panza G. Polarized Plate Tectonics // *Advances in Geophysics*. 2015. V. 56. P. 1–167. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.agph.2014.12.001/>.
2. Ребецкий Ю.Л., Мягков Д.С. Генезис тангенциальных массовых сил в литосферных плитах и их роль в геодинамике // *Вестник КРАУНЦ*, 2020. № 3. С. 88-97.

## Определение параметров мелких метеорных тел: сравнение модели пористого и сплошного тела

---

Ефремов В.В. (1), Попова О.П. (1), Глазачев Д.О. (1), Margonis A. (3, 4), Oberst J. (4), Карташова А.П. (2)

(1) ИДГ РАН, Москва, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия

(3) Technische Universität Berlin, Institute of Geodesy and Geoinformation Science, Berlin, Germany

(4) German Aerospace Center (DLR), Institute of Planetary Research, Berlin, Germany

e-mail: efremov.vv@phystech.edu

Метеорные тела, наряду с астероидами и кометами, несут важную информацию о нашей Солнечной системе. Большинство метеорных тел не достигают поверхности Земли, поэтому их свойства приходится определять по косвенным признакам. Основной способ получения информации о свойствах метеорных тел - изучение их взаимодействия с атмосферой. Несмотря на длительную историю изучения метеорных явлений, проблема точного определения массы, плотности и свойств вещества метеороида по наблюдательным данным остается до конца нерешённой.

В работе использовались наблюдения потока Персеид, проведенные в 2016 году в Греции. Для оценки параметров этих метеорных тел (массы, плотности и т.д.) использовалась модель абляции, в которой энергия набегающего потока расходуется на излучение, нагрев и потерю массы метеороида. Метеорное тело рассматривалось в двух модификациях: как сплошное и как пористое тело. Торможение пористого тела рассматривается как торможение единого сферического объекта, а испарение вещества происходит с фрагментов минерального вещества, образующих метеороид. Был разработан автоматизированный метод оценки параметров мелких метеорных тел, было проанализировано влияния функции невязки и неопределенности в зависимости давления насыщенного пара от температуры на параметры метеорного тела. Было показано, что определение массы и размера метеороида слабо зависит от выбора функции невязки. Предполагаемая зависимость давления насыщенных паров незначительно влияет на оценку массы, более выраженный эффект имеет место для оценки радиуса. Модель пористого тела слабо влияет на оценки массы, но влияет на оценки размера и плотности (увеличивается до двух раз). Плотность метеороидов в рамках нашей модели определяется с большой неопределенностью для одного и того же метеора при использовании различных функций невязки и давления паров. Сравнение наших оценок плотностей с данными для кометного вещества показывает, что они попадают в диапазон известных плотностей комет.

## Закон продуктивности землетрясений

---

**Шебалин П.Н., Баранов С.В., Воробьева И.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт теории прогноза землетрясений  
Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: shebalin@mitp.ru

Землетрясения обычно сопровождаются афтершоками. Количество афтершоков — продуктивность — зависит от магнитуды землетрясения. При сейсмическом моделировании обычно предполагается, что количество афтершоков примерно одинаково для землетрясений одинаковой магнитуды. Это одно из основных предположений, на которых основаны расчеты. Хотя известно, что в действительности это число может варьироваться в широких пределах, лишь недавно была установлена закономерность таких изменений, названная законом продуктивности землетрясений. Если рассматривать только прямые афтершоки в фиксированном диапазоне магнитуд относительно магнитуд основных толчков, то их количество для совокупности землетрясений в некотором пространственно-временном объеме имеет экспоненциальный вид распределения. Это означает, что о меньшее число более вероятно, а наиболее вероятным исходом является полное отсутствие афтершоков. Эта закономерность контринтуитивна, особенно при рассмотрении афтершоков в широком диапазоне магнитуд. Нам удалось подтвердить выполнение закона продуктивности землетрясений для широкого диапазона магнитуд. Для землетрясений магнитудой 6 и выше в наземной части Японии подтверждено, что частотное распределение числа их прямых афтершоков с минимальной магнитудой менее 5 единиц имеет экспоненциальный вид. При моделировании сейсмичности подтвержденный закон продуктивности землетрясений позволяет заменить неверное предположение о постоянной продуктивности землетрясений экспоненциальным распределением. Единственный параметр этой закономерности легко определяется по фактическим данным. Это снимает, в частности, существенное ограничение для широко используемой модели ETAS, состоящее в требовании, чтобы среднее число непосредственных афтершоков на одно событие-триггер было меньше 1, иначе последовательность событий расходится. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 20-17-00180.

## Исследование особенностей кластеризации краткосрочной сейсмичности в восточной части Эгейского моря (Греция) с помощью стохастической модели эпидемического типа

---

**Kourouklas C., Papadimitriou E., Mangira O.**

Aristotle University of Thessaloniki, Салоники, Греция

e-mail: ckouroukl@geo.auth.gr

Исследование свойств краткосрочной сейсмичности является одним из основных инструментов для разработки стохастических моделей возникновения землетрясений. Эти модели имеют дело с тенденцией землетрясений группироваться как в пространстве, так и во времени. Свойства кластеризации исследуются с помощью разработки статистических моделей, объединяющих хорошо известные законы сейсмологии (например, законы Омори, Гутенберга и Рихтера). Основное предположение, на основе которого сформулированы эти модели, состоит в том, что каждое землетрясение способно вызывать свои собственные события, в зависимости от истории предыдущих землетрясений. На протяжении многих лет большое количество исследований было также сосредоточено на ретроспективном и/или перспективном прогнозе как развития афтершоков вскоре после возникновения крупных основных толчков, так и возникновения крупных землетрясений.

Возникновение в 2017 году  $M_w = 6,4$  на Лесбосе, в 2017 году  $M_w = 6,6$  на Косе и в 2020 году на Самосе  $M_w = 7,0$  основных толчков в Восточной части Эгейского моря открывает возможность применения и проверки модели кластеризации, а именно последовательности землетрясений эпидемического типа (ETES), в их афтершоковой активности. Вычисления выполняются в каталоге землетрясений, охватывающем период с 2008 по 2020 год, который разделен на два подкаталога, соответствующие периодам обучения и тестирования.

Ретроспективная оценка модели рассматривается с помощью трех последовательностей афтершоков, где отсутствие афтершоков привело к низкой предсказуемости основных толчков. Сразу после возникновения основного толчка модель корректируется с заметным сходством между ожидаемой и наблюдаемой частотой повторных толчков. Этот более поздний результат подчеркивает потенциальное использование ежедневных прогнозных оценок, которые могли бы позволить исследовать вариации сейсмичности, приводящие к обнаружению повышенной потенциальной активности передового толчка за несколько часов до возникновения сильного события, а также эволюции афтершоковой активности.

## Кластеризация свойств сейсмичности в отдельных районах Греции

---

**Bountzis P., Papadimitriou E., Tsaklidis G.**

Aristotle University of Thessaloniki, Салоники, Греция

e-mail: pmpountzp@geo.auth.gr

Эффективность исследования кластеризации землетрясений повышается по мере того, как мы получаем доступ к большим наборам данных из-за повышения возможности обнаружения землетрясений. В данной работе мы стремимся представить всесторонний анализ свойств кластеризации в трех основных сейсмических зонах Греции в 2012 - 2019 годах с использованием процедуры кластеризации MAP-DBSCAN. Зависящая от времени стохастическая точечная модель, Марковский процесс прибытия (MAP), реализована для обнаружения точек изменения скорости сейсмичности, а затем алгоритм кластеризации на основе плотности DBSCAN используется для группировки событий в пространственно-временные кластеры. Двухэтапная процедура кластеризации MAP-DBSCAN применяется к трем сейсмическим зонам, выявляющим кластеры землетрясений. Региональная изменчивость показателей их продуктивности исследуется на основе общих оценок модели последовательности афтершоков эпидемического типа (ETAS). Сейсмичность в сейсмической зоне Коринфского залива характеризуется низкой производительностью афтершоков и высокими фоновыми показателями, что указывает на доминирование роевой активности, в то время как в сейсмической зоне Центральных Ионических островов, где доминируют основные последовательности толчков и афтершоков, показатели продуктивности афтершоков выше. Продуктивность в сейсмической зоне Северной части Эгейского моря значительно различается между кластерами, что вероятно связано с сосуществованием активности роя и последовательностей афтершоков. В результате проведенного исследования был сделан вывод о том, что включение региональных вариаций производительности в модели прогнозирования, такие как модель последовательности афтершоков эпидемического типа (ETAS), может улучшить оперативное прогнозирование землетрясений.

## Оценка энергии подвижки в экспериментах типа стик-слип

---

Казначеев П.А., Майбук З.Я., Пономарев А.В., Соболев Г.А., Кох В.В.,  
краюшкин Д.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта  
Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: p\_a\_k@mail.ru

Работа посвящена исследованию энерговыделения при процессе прерывистого скольжения блоков горных пород по модельному разлому (эксперименты типа стик-слип).

Экспериментальная установка представляла собой рычажный пресс, усилие которого через два пуансона приложено к двум блокам горной породы (светлый мрамор), прижатым друг к другу. Блоки представляют собой наклонные параллелепипеды с наклоном около 70 градусов, прижатие блоков осуществляется за счет внешнего поджима стягивающим приспособлением.

Исследованы режимы скольжения с двумя разными жесткостями нагружающей установки, отличающимися примерно в 10 раз. В одном режиме (с меньшей жесткостью - «мягкое» нагружение) между пуансоном и блоком устанавливался пружинный динамометр, в другом режиме (с большей жесткостью - «жесткое» нагружение) динамометр не устанавливался.

Регистрировались следующие параметры: смещение блоков друг относительно друга с высоким временным и амплитудным разрешением (с помощью лазерного дальномера), смещение с меньшим временным, но большим амплитудным разрешением (с помощью датчиков смещения типа LVDT), акустическая эмиссия (с помощью системы регистрации ALine-32D), усилие (с помощью тензометрической станции АТМ).

Проведено несколько нагружений на полный возможный ход смещения блоков друг относительно друга. В ходе каждого нагружения регистрировалось несколько (до двадцати) эпизодов сильных быстрых подвижек. После проведения экспериментов измеренные данные были обработаны и более подробно проанализированы.

Среднее значение наблюдаемых подвижек составило около 250 мкм. Применение высокоскоростного лазерного дальномера позволяет оценить не только абсолютную величину подвижки, но и динамические параметры в процессе подвижки, в частности – скорость и ускорение. Среднее значение амплитуды скорости составило около 0.15 м/с. По этим данным можно оценить механическую энергию подвижки, в предположении, что она переходит в кинетическую энергию движения при разгоне блока и в работу силы трения на его торможение. При этом оценка кинетической энергии и работы сил трения может быть сделана независимым друг от друга образом. Среднее значение и кинетической энергии блока, и работы силы трения составило около 0.7 Дж.

Отдельно была построена зависимость максимальной измеренной при подвижке скорости блока и квадратного корня из энергии, оцененной через работу сил трения. Зависимость показывает характер, близкий к линейному, при варьировании энергии в диапазоне от 0.6 до 1 Дж и скорости в диапазоне от 0.1 до 0.2 м/с.

Основной параметр динамической оценки – это масса блока, которая может быть оценена двумя независимыми способами. Первый – через энергию при предположении, что вся кинетическая энергия переходит в работу сил трения. Второй – через известные объем блока и плотность горной породы. Оценка дает близкие величины, отличающиеся не более чем на 20%.

Работа выполнена в рамках гос. задания ИФЗ РАН.

## **О возможных механизмах влияния солнечной активности на сейсмичность Земли**

---

**Тарасов Н.Т.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: tarasov@ifz.ru

Изучено влияние магнитных бурь (МБ) и всплесков интенсивности электромагнитного ионизирующего излучения Солнца (ЭИ) на глобальную сейсмичность Земли. Показано, что ЭИ, также как и МБ, вызывают статистически значимое уменьшение общего количества землетрясений. После всплесков ионизирующего излучения происходит статистически значимое уменьшение суммарной энергии землетрясений, а после геомагнитных бурь наблюдается ее возрастание. В основном это происходит за счет роста количества наиболее сильных землетрясений с  $M_s > 7$  после МБ и уменьшения числа таких землетрясений после всплесков ЭИ. Во время геомагнитных бурь и в течение нескольких суток после них вероятность возникновения сильных землетрясений более чем в 2 раза повышается, а после всплесков ионизирующего электромагнитного излучения Солнца такая вероятность почти в 2 раза снижается.

Полученные результаты прежде всего показывают, что процессы, протекающие на Солнце, оказывают влияние на сейсмичность Земли и, следовательно, на состояние ее литосферы. Однако картина их взаимодействия очень сложная. Факторы разной физической природы, порождаемые солнечной активностью, могут влиять на литосферу Земли и ее сейсмичность разнонаправлено. Воздействие интенсивных всплесков ЭИ приводит к уменьшению вероятности возникновения катастрофических землетрясений почти в два раза, а магнитных бурь, напротив, к повышению такой вероятности почти на треть. Но наиболее сильно, более чем в два раза, она возрастает после магнитных бурь, перед возникновением которых в течение трехсуточного интервала фиксировались всплески интенсивности ионизирующего излучения Солнца. Следовательно, характер воздействия этих факторов на состояние литосферы и ее сейсмичность может меняться в зависимости от их сочетания.

После ЭИ подавление сейсмичности наблюдается без заметной задержки, а ее активизация после МБ происходит только через 2-5 суток. Последнее обстоятельство отмечалось и раньше при искусственном облучении земной коры мощными электромагнитными импульсами, после которых активизация сейсмичности также возникала с задержкой в 2-5 суток. Кроме того, облучение приводило к повышению скорости сейсмотектонических деформаций, вносящих свой вклад в процесс квазипластического деформирования коры, что ускоряло релаксацию накопленных в ней упругих напряжений.

Всплески ЭИ вызывают повышение ионизации ионосферы, что влияет на параметры глобальной электрической цепи, приводит к изменению активности мировых грозных центров, ухудшают условия распространения радиоволн от естественных и техногенных источников. Это снижает интенсивность электромагнитного фона на огромных территориях и уменьшает его триггерное воздействие на сейсмичность, что может вызвать ее подавление и замедлить релаксацию упругих напряжений в коре.

Во время МБ также ухудшается распространение радиоволн. Тем не менее, они оказывают более сильное триггерное воздействие на области подготовки сильных землетрясений. Одной из причин этого могут быть теллурические токи, индуцируемые в земной коре изменениями геомагнитного поля. Их воздействие на нестабильные области земной коры может инициировать сильные землетрясения. Другой причиной может быть явление магнитопластики. Скорость

пластического течения массивов горных пород может изменяться при изменении геомагнитного поля, что также должно оказывать триггерное воздействие на нестабильные участки земной коры.



# Индукцированная сейсмичность на Коробковском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии

---

Беседина А.Н. (1), Брайченко Г.Т. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Московский физико-технический институт, Москва, Россия

e-mail: besedina.a@gmail.com

В данной работе проведено исследование масштабных соотношений для слабых сейсмических событий, индуцированных массовыми взрывами, проводимых при разработке Коробковского железорудного месторождения Курской магнитной аномалии. Особенности обследуемого участка является наличие крупной разломной зоны и существенное превышение величины горизонтальных напряжений над вертикальными, несмотря на небольшую глубину выработки около 300 м от свободной поверхности.

Измерительная система состояла из 4 измерительных точек, оборудованных акселерометрами Brüel&Kjaer 8306 и Dytran 3191 с рабочей полосой частот 0.08 Гц – 1 кГц и частотой опроса 10 кГц. Одна измерительная точка была дополнена до трехкомпонентной, что позволило использовать поляризационный анализ для локации сейсмоакустических событий. Было обнаружено, что источники зарегистрированных сейсмических событий плотно сгруппированы в пространстве вблизи ближайшей взрывной камеры, и большинство находится внутри области с уровнем динамических деформаций от взрывов более  $10^{-6}$ .

Определение очаговых параметров проводилось по модели Дж. Брюна и модели кругового разлома Р. Мадариага. Полученные значения магнитуд от -2.6 до -1.7 и угловых частот от 320 до 715 Гц соответствуют радиусам очага от первых метров до первых десятков метров. Величина рассчитанной сейсмической энергии варьируется от 0.001 до 10 Дж, приведенной сейсмической энергии – от  $3 \cdot 10^{-8}$  до  $4 \cdot 10^{-6}$  Н·м.

Для кластеризации сейсмических событий применен подход, используемый для анализа сигналов акустической эмиссии при деформировании геоматериалов. Используемая методика позволила выделить две группы слабых сейсмических событий, которые характеризуются различными масштабными соотношениями – поведением приведенной сейсмической энергии при увеличении масштаба события.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 122032900172-5.

# Сильные вариации геоиндуцированных токов в проводящих сейсмогенных разломах земной коры как возможный триггер землетрясений

---

**Новиков В.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва, Россия

e-mail: novikov@ihed.ras.ru

Несмотря на довольно большое количество публикаций по возможной связи геомагнитной и сейсмической активности, данный вопрос до сих пор остается дискуссионным. В тех случаях, когда авторами статистически была установлена положительная связь между этими явлениями, то она должна указывать на возможное триггерное воздействие вариаций геомагнитного поля на очаг землетрясения. Предпринятые попытки феноменологического объяснения возможных механизмов такого воздействия до сих пор не прояснили их физическую природу, что ставит под сомнение их реальное существование. В настоящей работе рассматривается гипотеза о возможном триггерном воздействии теллурических токов, генерируемых в разломах земной коры сильными вариациями геомагнитного поля. Данная гипотеза основана на полученных ранее результатах лабораторных экспериментов и полевых наблюдений, которые показывают, что импульсы электрического тока, подаваемого в земную кору от мощных искусственных источников, могут вызывать рост трещинообразования в горных породах, инициировать слабые землетрясения и приводить к пространственно-временному перераспределению региональной сейсмической активности.

Известно, что одним из наиболее существенных проявлений космической погоды являются геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ), возбуждаемые в поверхностных слоях Земли и проводниках при резких изменениях геомагнитного поля. Поскольку ГИТ представляют собой опасность для трубопроводов, магистральных кабельных линий, высоковольтных ЛЭП, железнодорожного оборудования, морских и наземных коммуникационных кабелей, это явление в настоящее время достаточно хорошо изучено для проводящих технических объектов развитой инфраструктуры. Практически неизученными являются ГИТ в проводящих разломных зонах земной коры, а также их воздействие на деформационные процессы в земной коре. Следует отметить, что вследствие насыщенности разломов земной коры высокоминерализованными флюидами или графитизации разлома (образование тонких графитовых пленок на бортах разлома в результате предыдущих землетрясений) его проводимость может на несколько порядков превышать проводимость вмещающих горных пород. Ранее расчетными оценками было показано [Sorokin et al, 2017], что при сильных возмущениях геомагнитного поля  $\sim 102$  нТл плотность теллурических токов в проводящем разломе может достигать  $10^{-6}$  А/м<sup>2</sup>, что на порядок выше плотности тока, генерируемого в очагах землетрясений искусственными импульсными источниками постоянного тока, подаваемого в земную кору через заземленный электрический диполь. Таким образом, при определенных условиях (уровень напряженно-деформированного состояния разлома, его проводимость и ориентация) ГИТ, возбуждаемые в разломах резкими вариациями геомагнитного поля, могут инициировать землетрясения. Данное предположение подтверждено статистическим анализом влияния сильных геомагнитных бурь на сокращение рекуррентного периода слабых повторяющихся землетрясений на разломе Сан-Андреас, Калифорния. Показано, что если геомагнитная буря с  $K_p \geq 8$  происходит в конце рекуррентного периода, то она приводит к его сокращению, что является дополнительным подтверждением существования электромагнитного инициирования сейсмических событий сильными геомагнитными бурями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН в рамках научного проекта № 21-51-53053.

## Проблемы идентификации тектонических движений методами спутниковой радиоинтерферометрии

---

Тубанов Ц.А. (1, 3), Чимитдоржиев Т.Н. (2), Дмитриев А.В. (2),  
Будаев Р.Ц. (1)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт им. Н.Л. Дубрецова Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

(3) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

e-mail: ttsyren@gmail.com

Слабые и умеренные землетрясения обычно приводят к небольшим смещениям грунта на поверхности. Для таких событий поля деформации грунта, обнаруженные спутниковой интерферометрией, могут быть замаскированы или нечетко различимы в распределении интерференционных полос из-за наличия источников ошибок, таких как влияние атмосферы, неточностей опорной цифровой модели рельефа и орбитальные погрешности.

Нами проведено комплексирование метода дифференциальной радиолокационной интерферометрии (ДРИ, *DinSAR*) и метода постоянных рассеивателей (*Persistent Scatterers*, *PS*) с использованием временных серий *Sentinel-1B* и *ALOS PALSAR*. Зонирование подвижных блоков и оценка трендов направленности движений проводились методом ДРИ. При помощи метода *PS* проведена детализация характера деформации поверхности. Для этих постоянных рассеивателей рассчитывается множество интерферометрических фазовых соотношений относительно одного опорного изображения, которые позволяет более точно, по сравнению с ДРИ, оценить величину и скорость деформаций, дискретно расположенных постоянных рассеивателей. Увеличение точности достигается за счет использования нескольких десятков интерферограмм. Это позволяет существенно уменьшить влияние атмосферы и неточностей опорной цифровой модели рельефа и орбитальные ошибки. Недостаток метода *PS* – результат в виде отдельных точек, поэтому логичным является его комбинирование с ДРИ, результатом применения которой является непрерывное поле деформаций поверхности.

В результате спутниковых измерений, полученных за период времени с 06 мая 2017 по 05 октября 2020 г. для района Быстринского землетрясения с магнитудой  $M=5,5$  (произошедшего 21 сентября 2020 г. вблизи южной оконечности озера Байкал), обнаружены два блока с различными скоростями положительных деформаций до 2020 г. В 2020 г. скорость поднятия для этих блоков стабилизировалась и перед землетрясением разность величин деформаций составляла 16-18 мм. Результирующие деформации за 3 года составили в среднем примерно 17 мм и 30 мм для различных областей. Аналогичные расчёты, выполненные за период времени с 1 января 2007 по 27 февраля 2011 г. для Култукского землетрясения с магнитудой  $M=6,3$  (27 августа 2008 г.) позволили выявить сопоставимые разности величин деформаций и динамики блоков перед этим сейсмическим событием (порядка 12-13 мм). Меньшая разность величин деформаций земной поверхности для Култукского землетрясения по сравнению с Быстринским вероятно связана с большей удаленностью исследованной территории от эпицентра сейсмического события.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии медленных тектонических движений, приводящих к землетрясению и перспективности комплексного использования методов спутниковой радиолокационной интерферометрии для регистрации деформаций земной поверхности, предшествующих сейсмическим событиям.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, в рамках государственных заданий тем НИР ИФМ СО РАН (121032500022-8), ИЗК СО РАН (121041600031-1).

## Численное моделирование создания сети трехмерных трещин в породах-коллекторах со сложным минеральным составом на микромасштабе

---

Начев В.А. (1, 2), Турунтаев С.Б. (1)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия

e-mail: nachev@phystech.edu

Эффективные операции по гидроразрыву пласта не всегда выполняются, даже если крупномасштабное геомеханическое моделирование предполагает благоприятные условия эксплуатации. Чтобы повысить эффективность операций ГРП, авторы проводят исследование, чтобы понять, что происходит с гидравлическим разрывом на масштабе пустот. В процессе проведения ГРП возможны два принципиально разных режима. Первый режим – это когда имеется одна доминирующая первичная трещина и небольшие боковые трещины, в то время как второй режим – это, когда имеется разветвленная конфигурация трещины. Данная работа направлена на изучение распространения трещин во время операций гидроразрыва пласта, чтобы определить условия, которые приводят к наиболее обширной сети вторичных трещин наряду с первичными трещинами в масштабе пор. Авторы исследуют возникновение и распространение трехмерных трещин, учитывая минеральный состав и сложную текстуру упругопластичных пород, таких как плотные породы и богатые органикой аргиллиты.

Для моделирования распространения 3D-трещины мы выполняем несколько шагов. На первом шаге, проводится микроструктурное описание породы с использованием методом компьютерной томографии, сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии и рентгеновских методов. Геомеханическое описание породы включало набор лабораторных методов, таких как многостадийные испытания на прочность при сжатии, испытания на прямое растяжение, бразильские испытания на не прямое растяжение, микро- и наноиндентирование. Затем мы обрабатываем полученные данные, совмещая 2D-данные (СЭМ и QEMSCAN) с 3D-данными (КТ) и выбираем целевые репрезентативные объемы, представляющие интерес для моделирования. В конце, мы подготавливаем цифровые модели горных пород с помощью генерации сетки, заполнив модель механическими свойствами, определив контакты и установив граничные условия. Затем, мы моделируем напряженно-деформированное состояние в цифровых моделях горных пород и получаем конфигурации разветвленных трещин.

В результате мы подготовили интегральную модель, которая описывает распространение трехмерных трещин в микромасштабе и учитывает гранулированный состав, структуру образца, упругопластические свойства и условия межзеренных контактов минералов, содержащихся в образце. Проведенное численное упругопластическое моделирование выявило особенности зарождения и распространения трещин в гетерогенных 2D и 3D моделях со сложной геометрией контактов между минералами. Мы предложили теоретический метод, связывающий полученных результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния и геометрии трещины с давлением нагнетания жидкости во время операций гидроразрыва пласта для достижения максимального раскрытия трещины на месторождении.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122032900167-1).

## Совместный акустический и деформационный мониторинг трещины гидроразрыва в лабораторном эксперименте

---

Зенченко Е.В., Зенченко П.Е., Начев В.А., Турунтаев С.Б.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Moscow, Россия

e-mail: zenchevj@gmail.com

Приведены результаты лабораторных экспериментов по совместному активному акустическому и деформационному мониторингу трещины гидроразрыва. Эксперименты проводились в разных типах модельных материалов изготовленных на основе гипса. В одном случае использовался однородный материал, в другом случае модельный материал содержал в себе мраморную крошку. Также для сравнения были проведены эталонные эксперименты по исследованию прохождения ультразвуковых волн через заполненную жидкостью щель контролируемой ширины между двумя прецизионными стеклянными пластинами.

Основной целью экспериментов было исследование зависимости амплитуды ультразвуковой волны, прошедшей через трещину от величины её раскрытия. В этих экспериментах использовалась заранее образованная круговая трещина гидроразрыва, плоскость которой была перпендикулярна оси цилиндрического образца. Вдоль этой же оси располагалась обсаженная нагнетательная скважина, заканчивающаяся на середине его высоты. Диаметр образца составлял 104 мм, а высота 60 мм. Сам образец располагался между двумя дисками из алюминиевого сплава, оснащенных смонтированными 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.

По результатам проведенных экспериментов были построены зависимости амплитуды ультразвуковой волны, прошедшей через трещину, в зависимости от её раскрытия для материалов, имеющих различную степень шероховатости поверхности трещины. Полученные результаты позволят оценить величину раскрытия трещины гидроразрыва в лабораторных экспериментах, проводимых на образцах большего размера с использованием активного акустического мониторинга.

## Моделирование обрушения склонов при динамическом воздействии

---

**Шарафиев З.З., Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б.**

федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт динамики геосфер имени академика М.А. садовского российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: zulfatsharafiev@yandex.ru

В данной работе рассматриваются результаты лабораторных экспериментов, моделирующих субгоризонтальное воздействие низкочастотной сейсмической волны на склон. Установлено, что при однократном воздействии на склон импульса с большим ускорением, но с низкой скоростью, оползень не инициируется. Однако в этом случае возникают остаточные деформации, которые, накапливаясь, могут привести к возникновению склоновых процессов.

При многократном воздействии на склон наблюдается резкое снижение максимальной скорости смещения грунта, требуемой для обрушения склона. По мере снижения максимальной скорости при одних и тех же ускорениях накопление деформации происходит всё медленнее.

Большое внимание уделено движению гравитационного оползня. Для его изучения использовалась модель Ньюмарка, основой которой служит схема, где оползневое тело рассматривается в виде жесткого блока на наклонной поверхности. Проанализирована статическая устойчивость оползней, и дана оценка динамическому развитию процесса скольжения.

Были проведены серии экспериментов. Модель склона и блок (оползневое тело) располагались в массивном стальном контейнере размером 40x30x30 см. Сейсмическое воздействие моделировалось ударами по боковой поверхности контейнера. Смещение блока контролировалось лазерным датчиком. Согласно этой серии экспериментов необходимыми условиями возникновения динамического обрушения являются как достаточная величина смещения блока, так и достижение определенной скорости крипа, которая в модельных экспериментах составила 1,5 мм/с.

В условиях метастабильного состояния сползающей массы возникновение склоновых процессов определяется локальными факторами – небольшими вариациями угла склона, неоднородностями контакта.

Ранее для склоновых явлений эффекты снижения трения обсуждались лишь для крупных лавин с объемами свыше 106 м<sup>3</sup>. Однако по полученным нами результатам было показано, что эффект снижения трения с ростом скорости играет также весомую роль в формировании оползневых процессов меньшего объема. Установление причин этого интересного явления требует дальнейшего изучения.

## Оценка последствий столкновений астероидов и комет с Землёй

---

Глазачев Д.О., Попова О.П., Подобная Е.Д., Шувалов В.В., Артемьева Н.А.,  
Светцов В.В., Хазинс В.М.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: glazachevd@gmail.com

Удары космических тел (КТ) по Земле приводят к возникновению опасных эффектов, которые могут сразу после удара или впоследствии оказать вредное или губительное воздействие на человека, животных и растения, и на хозяйственные объекты. Одними из наиболее важных и опасных последствий падений астероидов и комет, являются разрушения на поверхности Земли, вызываемые ударной волной и тепловое излучение. Например, в случае Челябинского события 15 февраля 2013 г именно избыточное давление в ударной волне было главным поражающим фактором. При достаточной интенсивности теплового излучения оно может стать опасным для людей, приводить к ожогам и повреждениям сетчатки, привести к возникновению пожаров и даже к плавлению грунта. Кратерообразующий удар астероида размером 10–15 км, оставившего кратер Чикскулуб, вызвал глобальные лесные пожары, а знаменитое Тунгусское событие 1908 г., вызванное попаданием объекта диаметром около 50 м, вызвало лесной пожар в радиусе 10–15 км. Ударная волна также является причиной сейсмических явлений. Проведенное моделирование позволило оценить энергию сейсмических волн и сейсмическую эффективность для метеорных взрывов и кратерообразующих ударов. Образующийся в результате удара атмосферный плюм поднимается на большие высоты (100–300 км) и порождает атмосферные возмущения, распространяющиеся на расстояния до тысяч километров. Для кратерообразующих ударов важными характеристиками являются размер кратера и параметры слоя выброса из кратера (толщина слоя выброса и доля расплава в выбросах).

Ранее было проведено серийное численное моделирование взаимодействия космических объектов с атмосферой для большого числа различных сценариев в рамках гидродинамической модели. На основе этих результатов моделирования были построены аппроксимационные соотношения для оценки важнейших параметров ударной волны, теплового и сейсмического воздействий и атмосферных возмущений. Предлагаемые соотношения зависят только от свойств космического объекта (размер, плотность, скорость и угол входа). Они были использованы в специально созданном интернет-калькуляторе («Impact Effects» <http://AsteroidHazard.pro>), позволяющем быстро и достаточно точно оценивать различные эффекты падения космических тел.



## Фильтрация в среде с переменной проницаемостью

---

Торрес Т.М. (1), Беляков Г.В. (2), Таирова А.А. (1, 2), Юдочкин Н.А. (2)

(1) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук (ИДГ РАН), Москва, Россия

e-mail: rood818181@yandex.ru

Для увеличения эффективности добывающей скважины применяют метод гидроразрыва пласта. С этой целью в скважину нагнетают вязкую жидкость под большим давлением. В момент, когда давление жидкости превосходит прочность породы возникает трещина. Так как породы имеют пористую структуру и обладают некоторой упругостью, то при развитии трещины возможно сжатие скелета застеночного пространства. Изменение структуры пористого массива влечет за собой изменение проницаемости вокруг трещины. С одной стороны это оказывает влияние на рост трещины, т е вся энергия потока направлена на расклинивание породы, а с другой стороны при вытеснении нефти в трещину это ухудшает ее просачивание через стенки. Для выявления закономерностей изменения проницаемости в пристеночном пространстве на экспериментальной установке проведено исследование влияния фильтрации на напряженно-деформированное состояние пороупругой среды. Основная часть модельной установки состояла из ячейки Хеле-Шоу заполненной пористым сжимаемым материалом. В ячейку закачивалась вязкая жидкость, давление которой регистрировалось на входе, процесс изменения наряжено-деформированного состояния снимался на видеокамеру.

В ходе исследования было замечено, что жидкость при вхождении в пористую среду при больших давлениях напоминает поршень, который сжимает пористую среду, тем самым уменьшая проницаемость и снижая скорость волны фильтрации. По результатам экспериментов были определены скорости распространения фронта упругой волны, а также фильтрационной волны. Используя полученные данные были проведены оценки изменения напряженно-деформированного состояния. Полученные оценки позволили вычислить проницаемость сжатой области

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122032900167-1).

## Вклад угледобывающих предприятий в пылегазовое загрязнение окружающей среды

---

**Адушкин В.В.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: adushkin@idg.chph.ras.ru

Приведены результаты анализа негативного воздействия предприятий угольной промышленности на окружающую среду. Угольная промышленность России в настоящее время представлена 22 угольными бассейнами и 129 отдельными месторождениями, которые разрабатываются 130 угольными разрезами и 57 угольными шахтами, годовая добыча угля в 2019 году составила более 440 млн. т. Добыча и потребление угля оказывают существенное негативное воздействие на экологическое состояние окружающей среды в глобальном масштабе в виде загазованности и запыления атмосферы, кислотных дождей и потепления климата. Можно выделить три основных фактора. Во-первых, при добыче происходит выброс в атмосферу метана, содержащегося в угольных месторождениях в количестве от 10 м<sup>3</sup>/т до 100 м<sup>3</sup>/т (в среднем около 40 м<sup>3</sup> метана на одну тонну угля). Так, в отдельных шахтах Воркутинского бассейна содержание метана варьируется от 33.4 м<sup>3</sup>/т до 101.6 м<sup>3</sup>/т, в угольных шахтах Кузбасса от 11.7 м<sup>3</sup>/т до 59.5 м<sup>3</sup>/т. Прогнозные ресурсы метана в хорошо разведанных месторождениях России составляют 16.6 трлн. м<sup>3</sup>, в слабо разведанных примерно 33 трлн. м<sup>3</sup>. При подземной добыче угля шахты в России выбрасывают в атмосферу 5-7 млн. т. метана в год. При открытой добыче, в результате разрушения залежи угля, около 6% содержащегося в ней метана поступает в атмосферу, что составляет примерно от 1 до 3 млн. т. в год. Итого, в России при добыче угля поступает в атмосферу 7-10 млн. т. метана в год. Эмиссия метана в атмосферу сопровождается усилением парникового эффекта, поскольку метан более чем в 20 раз превышает углекислый газ по способности удерживать тепло в атмосфере.

Вторым фактором является поступление в атмосферу продуктов горения угля. Так, при сжигании 300 млн. т. угля, т.е. в количестве практически равном годовому потреблению угля в России, образуется 80 млн. т. CO<sub>2</sub>, 12 млн. т. NO<sub>x</sub>, 26 млн. т. микрочастиц и аэрозоля. При сжигании серосодержащего угля, в атмосферу поступает диоксид серы (SO<sub>2</sub>), который способствует образованию кислотных дождей. Возникающие при горении угля большие объемы углекислого газа и время его жизни в атмосфере около 120 лет, способствуют усилению его парникового эффекта.

В качестве третьего негативного фактора отметим выброс в атмосферу пылеватых мелкодисперсных частиц и ядовитых газообразных продуктов взрыва при открытой добыче угля с применением массовых взрывов. Применение массовых взрывов является основной технологией при открытой добыче угля, объёмы которой в настоящее время в 3-3.5 раза превышают объёмы подземной добычи. По материалам многочисленных измерений получены оценки удельной массы образовавшихся пылеватых частиц размером менее 30 мкм, долгоживущих в атмосфере. Так, при проведении массовых взрывов на 1 кг ВВ образуется примерно 0.08-0.1 кг подобных частиц. В результате для условий открытой добычи угля оценка массы выбросов пылеватых мелкодисперсных частиц в 2019 году составила 86-110 тыс. т.

## Численная оценка устойчивости охранных целиков при отработке смежных выемочных столбов наклонного пласта

---

Олегович Е.М.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

e-mail: eremin@ispms.ru

Устойчивость угольных целиков остается одной из важнейших практических задач обеспечения геодинамической безопасности подземных горных работ. Подземные выработки сильно нарушают напряженно-деформированное состояние нетронутого горного массива и вызывают перераспределение напряжений. Концентрация напряжений в окрестностях выработок обуславливает проявление внезапные выбросы пород и угля (горные удары), неустойчивость защитных целиков. Индуцированное повышенными напряжениями повреждение целиков иногда вызывает остановку добычи. Заполнение рабочих сечений вентиляционных или конвейерных штреков, вызванная разрушением целиков, приводит к остановке работы горно-шахтного оборудования, а также к возможным человеческим жертвам. Последнее приводит к ухудшению экономической эффективности шахты и необходимости ликвидации аварийной ситуации. По этой причине разработка научных основ сохранения эксплуатационных свойств защитных целиков является одной из важнейших задач геомеханики.

С развитием вычислительной техники для проведения высокопроизводительных вычислений, различные численные методы заняли значительную часть расчетов устойчивости целиков. Численное моделирование позволяет в явном виде учесть многие факторы, влияющие на поведение массива горных пород. Это сила тяжести, литология, тектонические напряжения, естественные нарушения сплошности, горно-технические параметры. Когда параметры модели откалиброваны в соответствии с экспериментальными и/или полевыми наблюдениями, результаты численного моделирования могут стать надежной основой для оценки устойчивости столбов.

В данной работе мы применяем конечно-разностный подход континуальной механики накопления повреждений к моделированию эволюции напряженно-деформированного состояния массива горных пород во время отработки смежных выемочных столбов в лавах наклонного пласта. Исходное состояние массива горных пород является результатом действия сил гравитации. Построена структурная модель массива горных пород, содержащего подземную выработку, на основе упрощенной стратиграфии Кондомского месторождения Кузнецкого угольного бассейна. По результатам численного моделирования выполнен анализ устойчивости угольных целиков.

## Оптические и газодинамические характеристики высокоскоростной плазменной струи в экспериментах "Флакрус" и "Северная Звезда"

Лосева Т.В. (1, 2), Косарев И.Б. (1), Поклад Ю.В. (1), Ляхов А.Н. (1, 2), Зецер Ю.И. (1), Урвачев Е.М. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

e-mail: losseva@idg.chph.ras.ru

Активные геофизические ракетные эксперименты "Флакрус" и "Северная звезда" с инъекцией высокоскоростных алюминиевых плазменных струй в ионосферу Земли проводились на высотах 140 км ("Флакрус") и выше 270 км ("Северная звезда"). Целью этих экспериментов являлось исследование процессов взаимодействия плазменных потоков с окружающей ионосферой, погруженной в геомагнитное поле.

Задача интерпретации данных наблюдений требует определения параметров плазмы и ее оптических характеристик на начальной стадии инъекции, которая осуществлялась с помощью разработанных в ИДГ РАН кумулятивных взрывных плазменных генераторов ВГПС-300 ("Флакрус") и ВГПС-400 ("Северная звезда").

Решение этой задачи возможно только в радиационно-газодинамической постановке (РГД), так как тепловое излучение существенно влияет на динамику плазмы, а его часть, испускаемая на большие расстояния от струи, является одной из основных причин ионизации, возбуждения и генерации интенсивного свечения воздуха.

Анализ лабораторных данных по инъекции алюминиевой струи в разреженный воздух различной плотности в специальной взрывной вакуумной камере позволил создать достаточно простую физико-математическую РГД модель, в рамках которой проводилось решение обратной задачи определения сценария инъекции струи. Модель включает в себя систему РГД уравнений в лагранжевых координатах для сферически-симметричной геометрии, описывающую динамику конусообразной струи в процессе и после окончания инъекции из сопла генератора, диффузионное приближение для многогрупповых уравнений переноса излучения, включая потери за счет излучения с боковой поверхности конуса. Модель учитывает РГД-процессы в веществе струи и в воздухе, распространение на большие расстояния теплового излучения, испущенного высокотемпературной плазмой. Возбуждение ионосферы под действием этого излучения оценивалось в рамках плазмохимической модели. Численное моделирование проводилось с использованием таблиц термодинамических и оптических характеристик алюминия, полученных в настоящих исследованиях, и известных ранее таблиц воздуха. Сравнение данных наблюдений по величинам плотности потока излучения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах показало хорошее согласие с данными расчетов. Полученные сценарии инъекции плазмы были использованы в двумерном моделировании начальной стадии эволюции струи, которое показало хорошее согласие результатов, полученных в двух подходах к решению задачи. Из двумерного расчёта видно, что струя сохраняет конусообразную форму на всем рассматриваемом промежутке времени, что говорит о корректности применения для описания начальной стадии движения плазменной струи одномерных сферически-симметричных уравнений газодинамики.

Разработанная модель позволяет корректно описать ту начальную газодинамическую стадию движения высокоскоростной плазменной струи, которая, вследствие малых времен, не могла

быть измерена датчиками, использованными в эксперименте, и которая формирует дальнейшее взаимодействие струи с ионосферой и геомагнитным полем.

## Построение модели тектонического разлома по данным наземных наблюдений

---

**Гридин Г.А. (1), Григорьева А.В. (2), Черемных А.В. (3), Остапчук А.А. (1)**

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

(3) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

e-mail: gagridin@gmail.com

В зонах тектонических разломов основная доля деформации локализована в узкой милонитизированной зоне, толщиной менее 1 см. Зона магистрального сместителя ограничена зоной повышенной трещиноватости, в которой плотность трещин снижается экспоненциально по мере удаления от сместителя. Изучение петрографических свойств горных пород позволяет выявить структурные изменения, вызванные действием прошедших тектонических деформаций. Анализ химического состава позволяет судить об изменении вещественного состава образцов, вызванного влиянием наложенных метаморфических и метасоматических процессов.

В настоящей работе в качестве объекта исследования была выбрана эксгумированная контактная область гранитного массива с амфиболитовым, расположенная на левом берегу Байкала, возле села Бугульдейка. На выбранном участке были отобраны 83 образца горных пород с пространственным шагом от 10 см до метров. Каждый отобранный образец имел точную привязку по GPS координатам, сфотографировано его точное положение в массиве, а также каждый образец был однозначно ориентирован в пространстве. Для каждого образца было выполнено петрографическое описание и определен химический состав.

Для данных химического состава построено кластерное дерево с использованием алгоритма минимального покрывающего дерева в метрике Чебышева. Отчетливо выделяется 3 кластера образцов, которые характеризуют различные структурные элементы исследуемой зоны. Выделенные элементы выделяются также по данным петрографического описания, а именно по степени раздробленности горных пород. По данным «точечного» отбора образцов удается восстановить плоскость простираения тектонического разлома, расположение которой подтверждается профилем электротомографии.

## Структура плоскости скольжения тектонического разлома по данным слабой сейсмичности

---

**Остапчук А.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: ostapchuk.aa@idg.ras.ru

Динамика деформирования массива горных пород в значительной степени определяется процессами, протекающими на границах массива, в частности, в зонах тектонических разломов. В зависимости от структуры тектонического разлома и фрикционных свойств плоскости скольжения на разломе могут быть инициированы как быстрые динамические события, так и события медленного скольжения. В процессе эволюции разлома в плоскости скольжения формируются особые области локализации напряжений – контактные пятна – зоны формирования которых, вероятно, определяются геометрией берегов тектонического разлома. Инициирование скольжения всегда происходит в окрестностях контактных пятен, характеризующихся свойством скоростного разупрочнения. Остановка же разрыва происходит в зонах между пятнами, характеризующихся свойством скоростного упрочнения. Определение пространственной конфигурации распространения контактных пятен и оценка их фрикционных свойств является неотъемлемой составляющей построения геомеханической модели тектонического разлома и определения динамики его скольжения.

И конфигурация, и фрикционные свойства могут быть оценены на основе анализа слабой сейсмичности, локализованной в окрестности тектонического разлома. В настоящей работе на примере разломов Калаверас и Сан-Андреас показан алгоритм восстановления структурных свойств тектонического разлома с пространственным разрешением 100 метров. При определении структурных свойств важным аспектом является анализ именно фоновой сейсмичности, не содержащей информации о форшоковых и афтершоковых последовательностях. В данных фоновой сейсмичности контактные пятна начинают проявляться уже через несколько лет после начала наблюдения. Показано, что события с магнитудой больше 5 локализованы в пределах контактных пятен.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №20-77-10087).

## Сейсмичность и микросейсмичность при воздействии на подземные флюидные системы

---

Турунтаев С.Б., Зенченко Е.В., Рига В.Ю.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, России

e-mail: stur@idg.ras.ru

Проблема прогнозирования реакции подземных флюидных систем на техногенное воздействие приобретает все большую значимость в связи с начавшимся во всем мире широким введением в эксплуатацию нетрадиционных месторождений нефти и газа и реализацией проектов по использованию геотермальных источников энергии. И в одном, и в другом случае предполагается проведение массовых гидравлических разрывов пластов (для повышения дебитов на месторождениях углеводородов, получения перегретой воды, для увеличения приемистости закачивающих скважин). Проведение многостадийных гидроразрывов является основным методом разработки сланцевых месторождений углеводородов, а также залежей в доманиковской и баженовской свитах в России. Наряду с задачами прогнозирования развития катастрофических последствий воздействий на недра, в последние годы повысился интерес к возможностям использования микросейсмического мониторинга для получения дополнительной информации о механических свойствах коллекторов, о сейсмодинамических и флюидодинамических процессах, происходящих в них. Наиболее широко сейсмический мониторинг используется для оперативного определения положения трещины гидроразрыва пласта. Появились и работы, показывающие возможность использования данных микросейсмического мониторинга для оценки проницаемости пласта. В докладе рассматриваются примеры возникновения сейсмичности, связанной с воздействием на подземные флюидные системы, вопросы повышения качества получаемых данных и их интерпретации, предлагается модель возникновения и распространения сейсмических событий при закачке, приводятся примеры результатов расчетов по предложенной модели. В докладе рассматриваются примеры возникновения сейсмичности, связанной с воздействием на подземные флюидные системы, вопросы повышения качества получаемых данных и их интерпретации, предлагается модель возникновения и распространения сейсмических событий при закачке, приводятся примеры результатов расчетов по предложенной модели.



## Глобальные геомагнитные возмущения, вызванные извержением вулкана Тонга 2022 г.

---

**Гаврилов Б.Г., Поклад Ю.В., Ряховский И.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук им. академика М.А.Садовского, Москва, Россия

e-mail: boris.gavrulov34@gmail.com

Исследование посвящено анализу возмущений геомагнитного поля и реакции Шумановского резонанса (ШР), вызванных извержением вулкана Тонга 15 января 2022 г. Глобальные геомагнитные возмущения могут быть связаны с генерацией в момент извержения атмосферно-ионосферных волн, которые приводят к изменению проводимости ионосферы, величины ионосферных токов и геомагнитного поля. Для подробного анализа были выбраны 10 станций INTERMAGNET, расположенных на расстояниях от сотен до десятков тысяч км от вулкана. Были выявлены характерные особенности временной формы вариаций геомагнитного поля, позволившие провести их сравнительный анализ, независимый от влияния локальных ионосферных неоднородностей на трассе распространения акустико-гравитационных волн (АГВ) и различия сигналов на разных азимутах по отношению к источнику. Анализ полученных данных позволил определить скорость распространения геомагнитных возмущений, которая составила 270 м/с, что соответствует скорости АГВ. Извержение сопровождалось и беспрецедентной грозовой активностью, вызвавшей значительный рост амплитуды электромагнитных сигналов на частоте ШР. Их регистрация проводилась в обсерватории Михнево в России, расположенной на расстоянии 15000 км от вулкана. Возможность проведения геомагнитных измерений и реакции ШР на молниевую активность в одной точке впервые позволила получить независимую от других геофизических данных оценку скорости распространения геомагнитных возмущений и времени фаз извержения, вызвавших генерацию гигантских атмосферных волн и накачку Шумановского резонатора. За время реакции ШР был принят момент максимальной амплитуды сигнала на частоте SR1, а время появления АГВ и соответствующего геомагнитного возмущения определялось в момент регистрации максимальной амплитуды отрицательной бухты полного вектора геомагнитного поля. Скорость распространения акустической волны определяется из временного интервала между этими событиями и расстояния по дуге большого круга от вулкана до обсерватории. Полученное значение скорости составило 293 м/с, что близко к скорости, оцененной по результатам измерений в сети Intermagnet. Различие в скорости на разных трассах связано с разным состоянием ионосферы и действием атмосферно-ионосферных ветров.

# Исследование динамики деформирования водонасыщенных коллекторов при сейсмическом воздействии

---

**Петухова С.М.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН), Москва, Россия

e-mail: sofya.petukhova@gmail.com

В работе представлены результаты комплексного анализа данных высокоточных измерений за динамикой деформирования водонасыщенных коллекторов, вскрытых в наблюдательных скважинах. Объекты исследований расположены в естественных условиях на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (Московская область) и природно-техногенных – в зоне влияния разрабатываемого железорудного месторождения Курской магнитной аномалии (г. Губкин, Белгородская область). Пункты наблюдений оборудованы аппаратурно-измерительными комплексами. В скважинах установлены датчики гидростатического давления, на приустьевых площадках расположены сейсмометры и барометры. Синхронизация регистрации в пунктах производится с использованием GPS-модулей.

Многолетние ряды гидрогеологических данных используются для оценки барометрической эффективности и приливной чувствительности рассматриваемых систем «пласт-скважина». Фильтрационные параметры – водопроницаемость и проницаемость рассчитываются на основе приливного анализа по фазовому сдвигу между приливными компонентами, выделенными в смещении грунта и уровне, в квазистационарных условиях. Интервалы значений, полученные в условиях сезонных и техногенных вариаций уровня подземных вод со скоростью более 5 см/сут, исключаются.

Особое внимание уделяется исследованию реакции водонасыщенных коллекторов на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений. Выполняется пересчет скоростей смещения грунта из ZNE в ZRT систему координат. На основе пороупругой модели [1] по сейсмическим данным определяется поровое давление с учетом отдельно объемной и сдвиговой составляющих деформирования водонасыщенного коллектора. Проводится сопоставление полученных значений с зарегистрированными гидрогеологическими откликами [2]. Подобный научно-методический подход в дальнейшем планируется использовать для прогнозной оценки относительной деформации водонасыщенных коллекторов с различными физико-механическими характеристиками.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 122032900172-5 Министерства науки и высшего образования РФ и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 20-35-90016.

1. Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth tide analysis // *Water Resour. Res.* – 1987. – V. 23. – P. 1824-1832.

2. Shalev E., Kurzon I., Doan M.-L., Lyakhovsky V. Water-level oscillations caused by volumetric and deviatoric dynamic strains // *Geophys. J. Int.* (2016) 204. P. 841–851. DOI: 10.1093/gji/ggv483.

## Реакция Шумановского резонатора на извержение подводного вулкана Hunga Tonga–Hunga Ha’apai.

---

**Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Ряховский И.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер им. ак. М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: poklad@mail.ru

Извержение подводного вулкана Хунга Тонга–Хунга Хаапай ( $20^{\circ}34' S$ ,  $175^{\circ}22' W$ ) в юго-западной части Тихого произошло 15 января 2022 года в 04:14:45 UT. Подъем вулканического облака сопровождался сильной грозовой активностью. По данным мировых сетей регистрации молний, количество разрядов за время основной фазы извержения (около двух с половиной часов), превысило 400000. Максимум разрядной активности был достигнут примерно через 45 минут после начала извержения (в 05:00 UT) и количество молний превышало значение в 5000 разрядов в минуту. Это примерно в 2 раза больше чем средняя грозовая активность по всей Земле. В ГФО «Михнево» с 2011 года ведется непрерывная регистрация вариаций магнитного поля в КНЧ диапазоне – от 0.001 до 120 Гц. В работе приводятся реакция Шумановского резонатора (ШР) на это извержение, по данным полученным в ГФО «Михнево». Во время извержения амплитуда первых трех мод ШР возросла в 2-2.5 раза по сравнению с фоновыми значениями. Нами было проведено сравнение параметров ШР с грозовой активностью в облаке по данным сети регистрации молний GLD360 и высоты подъема облака по данным съемок спутников GOES. Показано, что в целом амплитуда ШР хорошо коррелирует с грозовой активностью в облаке. В тоже время есть ряд особенностей, которые пока не имеют адекватного объяснения. В частности отмечаются короткие вариации амплитуды ШР, которые не коррелируют с количеством молниевых разрядов. Частоты первых трех мод ШР на это событие практически не отреагировали.

## Выделение в плоскости тектонического разлома зон формирования землетрясений с магнитудой $M_L > 5$

---

**Полятыкин В.В.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки имени академика М.А. Садовского Институт Динамики Геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: vladimir.polyatykin@gmail.com

Выделение в плоскости тектонического разлома зон формирования землетрясений с магнитудой  $M_L > 5$ .

В настоящей работе представлен новый метод анализа сейсмических каталогов, нацеленный на выявление зон тектонических разломов, в которых потенциально могут быть инициированы землетрясения с магнитудой больше 5, на основе сведений о фоновой сейсмичности.

Исследуемый сейсмический каталог, характеризующий сейсмический режим тектонического разлома, на первом этапе проходит процедуру декластеризации, т.е. удаляются все статистически связанные события и сохраняются только независимые события. В основе метода декластеризации лежит рассмотрение функции ближайшего соседа событий в многомерном пространстве “местоположение - время - магнитуда”.

На втором этапе к очищенному каталогу применяется алгоритм топологической фильтрации, направленный на выделение плотных групп скоплений точек очагов землетрясений. В качестве определения “уровня плотности” используется нечеткое сравнение величин плотности, которые определяются как геометрическое среднее выборки в пределах определенного радиуса локализации.

Для автоматического выделения зон формирования сильных событий сделано два предположения: 1) характерное расстояние между зонами формирования сильных событий согласуется с характерным попарным расстоянием между всеми событиями в каталоге; 2) из всех возможных конфигураций расположения зон формирования должна быть выбрана такая конфигурация, при которой количество зон максимально.

После выделения плотных множеств, зоны их локализации аппроксимировались эллипсом минимальной площади. Именно в окрестности эллипсов формируются очаги землетрясений с магнитудой  $M_L > 5$ .

# Вычислительный эксперимент по сравнению сглаживающего и триангуляционного подходов к анализу неоднородного распределения деформаций земной поверхности по данным GPS-наблюдений

---

Мансуров А.Н.

Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

e-mail: sur98gdirc@gmail.com

Проведен вычислительный эксперимент по расчету значений тензора скорости плоской деформации земной коры различными методами. Расчет производился на основе синтетических данных, имитирующих каталог скоростей геодезических реперов, получаемый в результате обработки данных многолетних GPS-наблюдений. Этот каталог был сгенерирован на основе простой блочной модели земной коры, содержащей единственный блок, движущийся относительно своего окружения. Таким образом, на окружающих этот блок линиях виртуальных разломов проявлялись кинематические эффекты, которые должны наблюдаться в разных геодинамических режимах: надвиг, транспрессия, сдвиг, трансенсия и раздвиг. Для получения синтетического каталога GPS-скоростей были выбраны точки поверхности, так, чтобы образованные ими треугольники и четырехугольники были геометрически по-разному расположены относительно разломов и скорости этих точек были приравнены к скоростям содержащих их блоков (без привнесения случайных ошибок). Затем на основе полученного каталога координат и скоростей этих точек производился расчет тензора двумерной деформации поверхности двумя методами: (1) с использованием пространственного сглаживания и (2) по отдельным тройкам или четверкам точек исходных данных. Результаты этого расчета сравнивались с ожидаемыми на основе исходной блочной модели типами деформации. Показано, что сглаживающий подход дает в целом достоверную картину, но при этом не показывает четких границ между областями с разными типами деформации. Расчет тензора двумерной деформации по отдельным тройкам пунктов в определенных случаях дает существенные искажения по характеру и направлению главных осей. Если для выбранных пунктов, лежащих по одну сторону от линии разлома, расстояния от них до этой линии примерно одинаковы, то результат расчета почти не будет искажен. Если же эти расстояния значительно различаются, то результат будет искажен, причем степень искажения зависит как от относительной разницы в расстояниях, так и от других геометрических особенностей положения пунктов.

# Распределение значений плоского тензора современных деформаций земной поверхности Памира и Тянь-Шаня, рассчитанное по триплетам пунктов GPS-наблюдений

---

**Мансуров А.Н.**

Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

e-mail: sur98gdir@gmail.com

На основе каталога скоростей пунктов наблюдений Центрально-Азиатской GPS-сети рассчитано распределение значений тензора современной плоской деформации земной поверхности для большей части Памира и прилегающих тектонических формаций, а также участков Центрального и Западного Тянь-Шаня. Каталог скоростей был получен в результате обработки выполненных в Научной станции РАН в г. Бишкеке многолетних GPS-наблюдений в ходе полевых экспедиций.

Расчет распределения деформаций земной коры произведен двумя методами: с использованием сглаживания с расстоянием, а также на основе отдельных наборов из трех-четырёх близлежащих пунктов GPS-наблюдений (триангуляция). Произведено сравнение результатов полученных с использованием этих двух подходов.

В результате сопоставления результатов расчета с картами разломов и тектонических структур выделены наиболее тектонически-активные в настоящее время области исследуемого региона и описан характер деформации в них:

- (\*) Главный Памирский Надвиг – поперечное укорочение с небольшим правым сдвигом;
- (\*) Каракульский грабен на Памире – поперечное удлинение;
- (\*) Конгур-Шанская система сбросов (Восточно-Памирский Пулл-апарт) – поперечное удлинение в северной части;
- (\*) Центральная и восточная части Таджикской Депрессии – субширотное укорочение;
- (\*) Зона сопряжения Таджикской Депрессии и Гиссарского хребта – предположительно, правый сдвиг;
- (\*) Нарынская впадина – укорочение поперек простираения;
- (\*) Область Токтогульского водохранилища – субмеридиональное укорочение;
- (\*) Суусамырская впадина – субмеридиональное укорочение;
- (\*) Джумгалская и Кочкорская впадины – укорочение по азимуту северо-северо-запад;
- (\*) Чуйская впадина – две субширотно вытянутые зоны субмеридионального укорочения.

Тауренис Д.А. (1), Барабаш Н.С. (1), Ряховский И.А. (2)

(1) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт динамики геосфер имени академика М.А. садовского российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: taurenis.da@phystech.edu

Современный уровень развития глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) дал возможность существенно продвинуться в вопросах изучения ионосферы. К настоящему времени использование ГНСС позволило накопить большой объем уникальных экспериментальных данных о структуре ионосферы – глобальном распределении ионизации, ее суточных, сезонных, климатических вариациях и полном электронном содержании (ПЭС). Высокое пространственно-временное разрешение систем ГНСС сделало возможным проведение исследований быстропротекающих процессов в ионосфере, вызванных различными гелиогеофизическими возмущениями (Солнечные вспышки, магнитные бури, землетрясения извержения вулканов и др.).

В работе представлен комплексный анализ динамики ПЭС во время солнечных вспышек X класса, произошедших в сентябре 2017 года. Увеличение интенсивности рентгеновского и ультрафиолетового (УФ) излучения, наблюдаемое во время хромосферных вспышек на Солнце, вызывает немедленное возрастание электронной концентрации во всей ионосфере. В настоящем исследовании была разработана методика оценки изменения ПЭС ионосферы, вызванного всплеском солнечной активности. Благодаря разработанному алгоритму, стала возможной обработка данных с более 500 наблюдательных пунктов, расположенных по всему миру. Используя базу данных значений спектрального потока УФ излучения модели FISM 2 Flare, были построены эмпирические зависимости изменения ПЭС ионосферы от потока УФ излучения в различных диапазонах длин волн для двух вспышек 6 и 10 сентября. По полученным результатам был определен диапазон длин волн, в большей степени определяющий изменение величины полного электронного содержания ионосферы во время Солнечных вспышек. Результаты поиска оптимального диапазона были подтверждены методами корреляционного анализа.

## О различии физических механизмов разноглубинных землетрясений и характера их ионосферного отклика

---

Родкин М.В. (1), Липеровская Е.В. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия

(2) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: rodkin@mitp.ru

Согласно теоретическим представлениям, хрупкое разрушение не может реализоваться на глубинах более нескольких десятков километров [Rodkin, 1995; 1996; Sornette, 1999; Houston, 2015; и др.]. Тем не менее, землетрясения происходят на глубинах до 700 км и более. Обычно это объясняется наличием глубинного флюида, снижающего эффективное трение в горных породах, и/или метаморфическими/фазовыми превращениями, активно реализующимися в погружающихся литосферных плитах.

Существенных различий между характеристиками очагов мелких, среднеглубинных и глубоких землетрясений выявлено, однако, не было. Некоторые такие различия недавно выявлены в [Родкин, 2021; Rodkin, 2021; 2022]. Показано, что одного наличия быстрых сдвиговых деформаций (и ответствующих им напряжений) недостаточно для возникновения в региональных сдвиговых зонах землетрясений глубже 30-50 км. При этом наблюдается тенденция роста максимальной глубины землетрясения с ростом скорости смещений вдоль сдвиговой зоны. Для возникновения более глубоких землетрясений необходим дополнительный фактор, связанный с метаморфическими преобразованиями, в частности с реакциями дегидратации. Показано, что типичные значения ряда характеристик землетрясений (нормированная продолжительность сейсмического процесса, кажущееся напряжение и др.) существенно различаются по глубине. Различия отвечают предполагаемым изменениям механизмов землетрясений. К интервалам глубины, отвечающих границам разных механизмов реализации землетрясений приурочены повышенные медианные значения кажущихся напряжений и длительности процесса сейсмического излучения.

Таким образом, из теоретических соображений, подкрепляемых сейсмологическими данными, получаем, что «нормальные» землетрясения могут происходить только в верхних 30-50 км литосферы. Землетрясения средней глубины, по-видимому, обусловлены дегидратационным охрупчиванием; более глубокие землетрясения предположительно связаны с твердотельными (фазовыми) превращениями.

В свете вышесказанного естественно предположить, что и характер предвестниковых эффектов разноглубинных землетрясений должен различаться. По данным станции вертикального зондирования ионосферы Токио (1957- 2020) исследованы часовые вариации критической частоты foF2, возникающие в связи с землетрясениями. Показано, что для землетрясений M6.0+ с глубиной очага  $h < 35$  км на расстояниях до 700 км от станции наблюдается статистически достоверная тенденция увеличения положительных вариаций foF2 за 1-2 суток до землетрясения. Для землетрясений M6.2+ с глубиной  $35 \leq h < 70$  км, на расстояниях до 500 км от станции с (-1) суток до (+2) суток наблюдается статистически достоверное уменьшение величин foF2 относительно фоновых значений. Амплитуда последней аномалии имеет тенденцию роста к моменту землетрясения. Различие характера предвестников свидетельствует в пользу различия соответствующих процессов подготовки землетрясений. Обсуждаются возможные физические механизмы наблюдаемого различия.

Houston H. Deep earthquakes. Treatise on Geophysics, 2nd edition, (2015), vol. 4, pp. 329-354.



Rodkin, M.V., “Crustal Earthquakes Induced by Solid-State Transformations: A Model and Characteristic Precursors,” *J. Earthquake Prediction Res.* 4 (2), 215–223, (1995).

Rodkin, M.V. Contradictions in the Recent Seismological Notions. *Phys. Chem. Earth.* 21 (4), 257–260. 1996.

Rodkin M.V. Earthquake Prediction: Old Expectations and New Results. *Seismic Instruments*, 2021, Vol. 57, No. 4, pp. 438–445.

Rodkin, M.V. The Variability of Earthquake Parameters with the Depth: Evidences of Difference of Mechanisms of Generation of the Shallow, Intermediate-Depth, and the Deep Earthquakes. *Pure Appl. Geophys.* (2022). <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02927-4>

Sornette D., (1999) Earthquakes: from chemical alteration to mechanical rupture. *Physics Reports*, 313, 5, 237-292, ISSN 0370-1573, [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(98\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(98)00088-X).

# Определение механизмов акустических событий в экспериментах по разрушению горных пород

---

Шихова Н.М., Патонин А.В., Пономарев А.В., Смирнов В.Б.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: shinami@yandex.ru

По данным лабораторных экспериментов при трехосном испытании образцов горных пород исследованы механизмы зарегистрированных акустических событий. Анализ проводился двумя методами на основе данных о координатах событий, знаков, времен и амплитуд приходов упругой волны на каждый из 16 ультразвуковых датчиков. Применение метода полярности [Zang et al., 1998] показало, что в начале эксперимента при увеличении нагрузки до уровня 0.5 от предела прочности, увеличивается доля трещин отрыва (событий Т-типа) при одновременном уменьшении доли механизмов сжатия (С-типа). Этап нагружения, соответствующий формированию магистрального разлома, сопровождается возрастанием доли событий сдвига (S-типа) до 60 %.

Второй, оригинальный метод - Acoustic Emission Source Axial Method (AESAM) [Shikhova, Patonin, 2021] расчёта тензора сейсмического момента (ТСМ) был использован для определения направления и величин векторов сжатия и растяжения, действующих в очаге акустической эмиссии (АЭ). Этот подход основан на квадрупольной модели источника с учётом диаграммы направленности датчиков АЭ. Применение алгоритма AESAM позволяет рассчитать ТСМ и оценить доли изотропной (ISO), сдвиговой (DC) и доли компенсированного линейного векторного диполя (CLVD) в общем механизме источника. Показана сходная динамика изменения долей типов событий, рассчитанных по алгоритму полярности, и компонент тензора сейсмического момента, определенных по методу AESAM. Получены статистически устойчивые закономерности изменения углов между направлением прикладываемой избыточной осевой нагрузки на образец и векторами сжатия – растяжения в источнике АЭ. Результаты расчётов демонстрируют зависимость вариаций направления сжатия-растяжения от соотношений величин действующих напряжений и типов испытываемой горной породы.

Работа выполнена в Центре коллективного пользования “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” ИФЗ РАН.

Zang A., F. Christian Wagner, Sergei Stanchits, Georg Dresen, Reimer Andresen and Mark A. Haidekker. Source analysis of acoustic emissions in Aue granite cores under symmetric and asymmetric compressive loads // *Geophys. J. Int.* 1998, 135, 1113–1130

Shikhova N., Patonin A. Methods for determining focal mechanisms in laboratory experiments // EGU General Assembly 2021, online, 19-30 Apr 2021, EGU21-3305, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-3305>.

## **Солнечные вспышки, сильные магнитные бури и вариации уровня сейсмического шума на территории северного Тянь-Шаня**

---

**Сычева Н.А.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: nelya@ifz.ru

Хотя наличие влияния солнечной активности на сейсмичность Земли можно считать установленным, о чем свидетельствуют многие работы (Соболев Г.А, Файнберг Э.В., Гульэльми А.В., Тарасов Н.Т. и др.), представляет интерес поиск и анализ новых примеров, в которых проявляется (или нет) влияние на сейсмичность геоэффективных солнечных вспышек и магнитных бурь с резким началом.

Исследований влияния солнечных вспышек и магнитных бурь на параметры сейсмического шума (на примере Северного Тянь-Шаня) автором проводились ранее, результаты представлены в работе (Сычева и др. , 2011).

Целью данной работы является продолжение исследований влияния солнечных вспышек и магнитных бурь на параметры сейсмического шума (на примере Северного Тянь-Шаня), с верификацией полученных ранее результатов. В качестве теста выбрана аномальная солнечная вспышка 6 сентября 2017 г. Повторный анализ стал особенно актуален после недавних публикаций (Тарасов, 2017, 2021, 2019) о первой реакции на вспышки – подавление глобальной сейсмичности, после которой, с задержкой могут происходить активации региональной сейсмичности.

В работе рассматриваются сильные магнитные бури, вызванные солнечными вспышками класса X, которые произошли в 23-й и 24-й солнечные циклы и их связь с сейсмичностью. Используются данные о временных зависимостях параметров сейсмического шума (среднего уровня, среднеквадратичного отклонения, СКО), регистрируемого станциями сейсмической сети KNET (Kyrgyz net) при мониторинге территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП, Северный Тянь-Шань).

При анализе СКО уровня сейсмического шума в период со вспышкой 06.09.2017 подтверждены результаты предыдущих исследований (2000-2006 гг.) о влиянии солнечных вспышек и магнитных бурь на характеристики сейсмичности территории Северного Тянь-Шаня.

Повышение значений СКО сейсмического шума – можно считать реакцией на эти экзогенные факторы. Увеличение СКО сейсмического шума обнаруживает более устойчивую корреляцию с магнитной бурей, чем с предшествующей ей солнечной вспышкой.

# Возможный сейсмогенно-триггерный механизм активизации разрушения ледников, эмиссии метана и потепления климата в Арктике и Антарктике

---

Лобковский Л.И., Баранов А.А., Габсатаров Ю.В., Владимирова И.С.

Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва, Россия

e-mail: llobkovsky@ocean.ru

Проблема потепления климата относится к числу острых проблем современности и, хотя сегодня доминирует точка зрения об антропогенной причине этого явления, связанной с промышленными выбросами углекислого газа в атмосферу, остаются вопросы, не нашедшие удовлетворительного объяснения в рамках данной парадигмы. Одним из таких вопросов является наблюдаемый резкий рост температуры на Земле, особенно в Арктике, приуроченный к началу 1980 года, который продолжается и в наши дни. Какого-либо скачка роста мирового промышленного производства в 1980 году не отмечено. Поэтому естественно обсудить возможные альтернативные подходы для объяснения внезапного начала быстрого потепления климата в указанный момент времени. Если обратиться к возможным природным факторам потепления климата, то очевидно, что они должны быть связаны с крупномасштабными процессами катастрофического характера, способными обеспечить резкий сдвиг климатической системы, приводящий к быстрому потеплению. Среди известных крупномасштабных катастрофических событий на Земле, происходящих достаточно часто, обращают на себя внимание сильнейшие землетрясения с магнитудой больше 8, приуроченные к зонам субдукции литосферных плит. Но как их связать с потеплением климата? Л. И. Лобковский впервые в 2020 году предложил гипотезу о том, что потепление в Арктике может быть обусловлено приходом деформационных тек-тонических волн, возбужденных сильнейшими землетрясениями в Алеутской ост-ровной дуге, в область арктического шельфа и разрушением добавочными напряжениями внутренней микроструктуры расположенных в мерзлых породах шельфа метастабильных газогидратов, что приводит к освобождению запертого в них метана и его эмиссии в атмосферу, вызывая потеплению климата вследствие известного парникового эффекта. Хронологическая приуроченность начала резкого потепления к 1980 году хорошо объяснялась тем, что самая мощная серия сильнейших землетрясений в Алеутской дуге (ближайшей к Арктическому шельфу) произошла в середине прошлого века - это землетрясения: 1957 г. ( $M = 8,6$ ), 1964 г. ( $M = 9,3$ ) и 1965 г. ( $M = 8,7$ ). Получается, что всплеск беспрецедентной сейсмической активности в Алеутской дуге произошел примерно за 20 лет до наступления фазы резкого потепления климата (1980 г.). Такой сдвиг в 20 лет логично объясняется скоростью распространения деформационных волн в системе упругая литосфера-вязкая астеносфера порядка 100 км/год, поскольку за это время волны проходят расстояние около 2000 км между арктическим шельфом и Алеутской дугой.

Аналогичный механизм, по-видимому, работает и для Антарктики. Здесь с конца прошлого века наблюдается резкая активизация процесса разрушения и откалывания шельфовых ледников, сопровождаемая аномальным потеплением климата. Анализ сильнейших землетрясений, происходящих в наиболее близко расположенных к Антарктиде зонах субдукции Тихоокеанской литосферы как в юго-восточной, так и в юго-западной ее частях показывает, что фазы разрушения шельфовых ледников на Антарктическом полуострове (ледники Ларсена), в районе моря Росса и в других местах коррелируют с временами возникновения очагов сильнейших землетрясений со сдвигом в первые десятки лет, связанным со временем прихода соответствующих тектонических волн в Антарктиду. При разрушении и отколе ледников в них образуются магистральные трещины и разломы, приводящие к локальному падению давления на подстилающие ледники осадочные породы, предположительно содержащие газогидраты, вызывая диссоциацию последних и выход освобожденного метана в атмосферу по этим разломам, приводя к парниковому эффекту

и потеплению климата. Необходимо отметить, что предложенная схема предсказывает дальнейшее ускорение разрушения ледников и потепления климата в Антарктиде в ближайшем будущем из-за беспрецедентного роста частоты сильнейших землетрясений в южной части Тихого океана в конце 20-го и начале 21-го веков.

## Образование трещины в пористой среде и заполнение ее твердыми частицами

---

**Таирова А.А., Беляков Г.В., Юдочкин Н.А., Торрес Т.М.**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: m5184@yandex.ru

Применение метода гидроразрыва для увеличения нефте- и газоотдачи пластов приводит к формированию новых поверхностей отбора углеводородов. Для сохранения раскрытия трещин в условиях действия горного давления необходимо своевременное введение в поток жидкости гидроразрыва твердых частиц - проппанта, препятствующих смыканию вновь образованных трещин. Трещины, заполненные крупными частицами (проппантом), отличаются повышенной проницаемостью по сравнению с вмещающими породами, что позволяет существенно увеличить нефтеотдачу с поверхностей трещин.

В процессе заполнения трещин ГРП проппантом может происходить неравномерное осаждение частиц по длине искусственно созданного канала, связанное с действием сил гравитации и с фильтрацией жидкости, несущей частицы. Под действием горного давления возможно смыкание части берегов трещин, приводящее к снижению эффективности используемой методики гидроразрыва.

Соответственно, одной из основных проблем рациональной разработки месторождений углеводородного сырья является выбор оптимального режима введения частиц в трещины гидроразрыва и определение условий их равномерного заполнения, а также разрушения сформированных «пробок» из проппанта.

Влияние фильтрации жидкости в окружающее пространство на перенос и осаждение частиц рассматривается не только в задачах нефтяной и газовой промышленности. В частности, при анализе геофизических явлений, связанных с кольматацией и декольматацией трещин в проницаемых массивах горных пород, также необходимо учитывать процессы переноса и осаждения частиц на стенках трещины.

В работе представлены пилотные эксперименты на модельной установке изучающие процесс развития трещины в пороупругой среде с введением частиц в нагнетаемый поток. Эксперимент проводился на оптически-прозрачной модели, позволяющей определить напряженно-деформированное состояние пороупругого скелета и скорость движения частиц. Представленная задача требует дальнейшего изучения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122032900167-1).

## Лабораторные исследования закономерностей фрикционного взаимодействия блоков скальной породы метрового масштаба (Методика и первые результаты)

---

Остапчук А.А. (1), Кочарян Г.Г. (1), Павлов Д.В. (1), Гридин Г.А. (1), Морозова К.Г. (1), Пантелеев И.А. (2)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского, Москва, Россия

(2) Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

e-mail: ostapchuk.aa@idg.ras.ru

Поиск физических механизмов, определяющих закономерности скольжения разлома и объясняющих нелинейные процессы эволюции на разных масштабных уровнях, является чрезвычайно сложной задачей. Постановки лабораторных и численных экспериментов, как правило, до предела упрощены, а малые размеры образцов сильно ограничивают возможности экспериментаторов, как в части постановки опытов, так и в части проведения измерений.

В работе представлена новая, уникальная для России лабораторная установка метрового масштаба, созданная в ИДГ РАН для исследования закономерностей развития различных режимов скольжения по нарушениям сплошности массива горных пород. Описана методика проведения экспериментов и приведены результаты первых серий опытов.

Лабораторный разлом представлял собой нагруженный контакт двух блоков длиной 75 см, изготовленных из диабазы. Разлом заполнялся гранулированным материалом. Нормальные напряжения на разломе могут достигать 10 МПа. Изменение вещественного состава заполнителя разлома и скорости нагружения позволило реализовать широкий спектр режимов скольжения: скольжение с постоянной скоростью, регулярное прерывистое скольжение, аperiodические акты медленного проскальзывания. Показано, что вариация скорости нагружения может приводить к существенному изменению режима скольжения. В ходе экспериментов при небольшом нормальном давлении, равном 2 МПа, было зафиксировано интенсивное фрикционное дробление гранул заполнителя, а при высокоамплитудном прерывистом скольжении, кроме того, выявлены структурные фазовые превращения зерен кварца, соответствующие локальному повышению температуры до 700 градусов Цельсия. Очерчен возможный круг задач для моделирования на подобных установках деформационных процессов, происходящих в зонах сейсмогенных разломов – предсейсмическая стадия неупругого поведения зоны магистрального разрыва при критическом уровне напряжений.