

Материалы XX Всероссийской конференции

гео



динамика,  
механика и  
физика

НОВОСИБИРСК • 2024

ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РАН  
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ им. А.А. ТРОФИМУКА СО РАН  
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И МИНЕРАЛОГИИ им. В.С. СОБОЛЕВА СО РАН  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. Н.Л. ДОБРЕЦОВА СО РАН  
ИНСТИТУТ АРХЕОЛОГИИ И ЭТНОГРАФИИ СО РАН  
НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## **ГЕОДИНАМИКА. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА**

**Материалы двадцатой Всероссийской научной конференции  
«Геодинамика. Геомеханика и геофизика»  
18–26 июля 2024 г.  
Новосибирск – Горный Алтай, Россия**

НОВОСИБИРСК  
2024

# САМОСТОЯТЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗДАНИЕ

УДК 551.2/.3+55:531+550.3+539.3

ББК 26.321+33.14–11+26.2

Г35

Программный и организационный комитет

Председатели: академик РАН В.Н. Пармон (Президиум СО РАН)

академик РАН М.И. Эпов (ИНГТ СО РАН)

Заместитель председателя: д-р геол.-мин. наук М.М. Буслов (ИГМ СО РАН)

Члены комитета:

академик РАН В.А. Верниковский (НГУ),	чл.-кор. РАН Е.В. Скляров (ИЗК СО РАН),
академик РАН Н.П. Похиленко (ИГМ СО РАН),	чл.-кор. РАН Д.В. Метелкин (НГУ, ИНГТ СО РАН),
академик РАН М.П. Федорук (НГУ),	д-р геол.-мин. наук М.М. Буслов (ИГМ СО РАН)
академик РАН В.С. Шацкий (ИГМ СО РАН),	д-р геол.-мин. наук С.М. Жмодик (ИГМ СО РАН),
чл.-кор. РАН Д.П. Гладкочуб (ИЗК СО РАН),	д-р геол.-мин. наук А.А. Цыганков (ИГ СО РАН),
чл.-кор. РАН В.Н. Глинских (ИНГТ СО РАН),	канд. геол.-мин. наук Н.В. Максимова (Президиум СО РАН),
чл.-кор. РАН Н.Н. Крук (ИГМ СО РАН),	канд. геол.-мин. наук Т.В. Чудаева (Президиум СО РАН)
чл.-кор. РАН И.Ю. Кулаков (ИНГТ СО РАН),	

Организационный комитет:

Председатель орг. комитета: д-р геол.-мин. наук М.М. Буслов (ИГМ СО РАН)

Ответственные секретари:

д-р геол.-мин. наук Е.А. Мельник (ИНГТ СО РАН),

канд. геол.-мин. наук А.В. Котляров (ИГМ СО РАН),

канд. геол.-мин. наук: И.Н. Мягкая (ИГМ СО РАН),

канд. геол.-мин. наук А.В. Куликова (ИГМ СО РАН)

Руководитель информационно-технического сопровождения:

Р.А. Беляев (сектор информационных технологий ИГМ СО РАН)

Г35 Материалы двадцатой Всероссийской научной конференции «Геодинамика. Геомеханика и геофизика» (18–26 июля 2024 г. Новосибирск-Горный Алтай, Россия) / Програм. и орг. комитет: В.Н. Пармон [и др.]; Отд-ние наук о Земле РАН [и др.]. – Новосибирск: СО РАН, 2024. – 1 опт. компакт-диск (CD-ROM)  
ISBN 978-5-6050996-3-5

В сборнике представлены труды двадцатой Всероссийской научной конференции «Геодинамика. Геомеханика и геофизика».

УДК 551.2/.3+55:531+550.3+539.3

ББК 26.321+33.14\_11+26.2

Издается в авторской редакции.

ISBN 978-5-6050996-3-5  
DOI 10.53954/9785605099635

© Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука СО РАН, 2024  
© Институт геологии и минералогии  
им. В.С. Соболева СО РАН, 2024

## ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЗАХОРОНЕНИЯ ВЫСОКОАКТИВНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

**Д.Ж. Акматов, В.Н. Татаринов**

*Москва, Геофизический центр РАН,  
d.akmatov@gcras.ru*

Основопологающим условием обеспечения геоэкологической безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) является сохранение изоляционных свойств геологических формаций на протяжении всего периода их радиобиологической опасности, превышающего 10 тысяч лет. Кинематика современных тектонических движений представляет собой ключевой фактор, который, благодаря своей энергетической значимости, определяет изоляционные характеристики структурно-тектонического блока, содержащего пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) [1].

Вместе с тем, значительную роль играют геомеханические процессы, влияющие на напряженно-деформированное состояние (НДС) массива, что может привести к ослаблению или разрушению приконтурной части выработок ПГЗРО. Одной из первостепенных задач геомеханических исследований является создание цифровой трехмерной модели, максимально соответствующей геолого-тектоническим условиям. Эта модель служит основным инструментом для выявления потенциально опасных зон, оценки устойчивости горных пород и многовариантного моделирования НДС.

Иерархический подход к оценке геомеханической безопасности ПГЗРО включает анализ структурно-тектонической модели, которая используется для задания граничных условий в моделях более высокого уровня [2]. Эти модели включают детальный анализ распределений напряжений вокруг выработанного пространства. Создание геомеханических моделей структурно-тектонического блока, содержащего ПГЗРО, в сочетании с иерархическим подходом, соответствует международной практике, применяемой в таких странах, как Китай, Финляндия, Швеция и США.

На основе разработанной геологической каркасной модели формируется блочная геологическая модель, которая может включать следующие данные:

- литологические характеристики пород.
- инженерно-геологическая документация.
- физико-механические свойства пород.
- классификационные характеристики массива горных пород.

Блочная геомеханическая модель представляет собой совокупность трехмерных блоков в пространстве с соответствующими атрибутами. Эта модель основана на двумерной таблице данных, где пронумерованы блоки и их атрибуты. Помимо физико-механических свойств также вносятся рейтинговые показатели (RMR, Q, RQD

и т.д.). Главной особенностью блочной геомеханической модели является выделение структурно нарушенных зон, в том числе зон динамического влияния разломов.

При проектировании подземных выработок ПГЗРО необходимо учитывать параметры массива, определяющие его устойчивость [3, 4]. Для оценки устойчивости выработок используется модернизированная рейтинговая классификация на основе Q-индекса Бартона, адаптированная к особенностям подземной изоляции РАО. В контексте захоронения РАО процедура классификации состоит из двух этапов. На первом этапе акцентируется внимание на исключение определенных разломов и их воздействий в пределах потенциальной площадки, а также на минимизацию других типов разрывных нарушений. На втором этапе проводится оценка пригодности выбранных потенциальных площадок для безопасного захоронения РАО. Оценочный индекс пригодности вмещающих пород для захоронения РАО включает факторы теплового воздействия, химического состава подземных вод и водопроницаемость вмещающего массива.

Разработанная блочная геомеханическая модель позволяет интегрировать все геомеханические параметры в единую цифровую пространственную среду, что обеспечивает систематический анализ опасных геомеханических процессов и безопасность при проведении строительных работ, включая управление радиоактивными отходами. В конечном итоге, такое объединение способствует повышению эффективности всего процесса.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России.*

- [1] Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В. Трёхмерная структурно-тектоническая модель Енисейского участка (Нижнеканский массив) // Горный журнал, 2023, № 1, с. 69–74.
- [2] Татаринов В.Н., Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Шевчук Р.В. Иерархический подход к оценке устойчивости геологической среды в геомеханических исследованиях // Горный журнал, 2024, № 1, с. 15–21.
- [3] Акматов Д.Ж. Оценка устойчивости участка «Енисейский» Нижне-Канского породного массива на основе трехмерной геомеханической модели // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2024, № 1 (специальный выпуск № 2), с. 3–16.
- [4] Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В., Забродин С.М. Оценка устойчивости породного массива в районе подземной исследовательской лаборатории (Нижнеканский массив, участок Енисейский) // Записки Горного института, 2024, т. 266, с. 167–178. EDN ECCWUV.

## ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И ТОЛЩИНЫ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА НА ФОРМУ СТРУКТУР НАРУШЕНИЙ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ СДВИГЕ В ОСНОВАНИИ

Р.А. Бакеев<sup>1,2</sup>, Ю.П. Стефанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новосибирск, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

<sup>2</sup>Томск, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
bakeev@ispms.ru

Деформационные структуры в осадочном чехле, происхождение которых связано со сдвиговой деформацией, являются наиболее распространёнными в земной коре [1–4]. Особое внимание сосредоточено на изучении строения структур горизонтального сдвига или цветковых структур, формирование которых обусловлено разрывным горизонтальным сдвигом в фундаменте, и решении обратной задачи восстановления строения структур в толще пород по форме разломов на дневной поверхности.

Строение цветковых структур достаточно хорошо изучено на природных объектах и в условиях лабораторных экспериментов. Но результаты численного моделирования позволяют прояснить ряд вопросов о пространственном строении таких нарушений, и сделать выводы о связи строения со свойствами горных пород и напряженным состоянием [5–7]. Известно, что эти структуры имеют сложную геликоидальную форму. В горизонтальном плане они выглядят как разлом с оперяющими структурами в виде эшелонированной система разрывов с определенным набором углов наклона. Вертикальные разрезы структур, проходящие поперёк разлома в основании, имеют форму цветка или пальмы.

Впервые аналитический анализ напряжённого состояния при сдвиге в основании был проведён Ю.Л. Ребецким [8]. Для вязко-упругой среды были рассчитаны главные напряжения и траектории главных осей, позволяющие сделать прогноз о форме структур нарушений. Численные исследования первым осуществил J. Braun [9], им представлены результаты моделирования для элемента земной коры, в основании которого расположены жёсткие литосферные плиты с разломом. Была получена характерная форма цветковых структур, проанализировано напряжённое состояние.

В настоящей работе с использованием численного моделирования решена задача об упруго-пластическом деформировании слоя осадочных горных пород при продольном сдвиге в основании. Проведён анализ напряжённого состояния на начальном этапе и в процессе деформирования, сделаны выводы о влиянии толщины деформируемого слоя, упругих свойств и эффективной прочности среды на форму структур.

Для описания макроскопической деформации горных пород используется модель Друккера-Прагера [10, 11], основанная на уравнениях упруго-пластичности. До наступления пластической деформации, напряжения рассчитываются по гипотезе упругого закона. Упругое состояние среды в пространстве напряжений ограничено

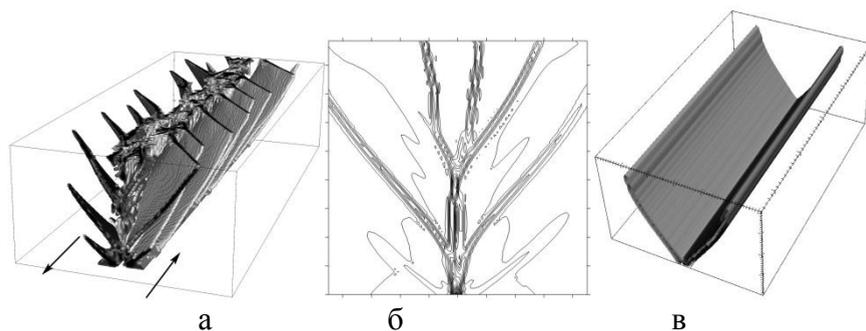


Рис. 1. Структуры нарушений в слое песчаника толщиной 4 см: цветковые структуры (а, б) и жёлоб (в).

поверхностью текучести, при достижении которой начинается процесс неупругой пластической деформации. Моделирование процесса осуществлялось при помощи численного решения системы уравнений динамики конечно-разностным методом второго порядка точности [12].

В ранних работах авторов [5–7] было показано, что можно выделить три основных типа структур нарушений при сдвиге в основании: субвертикальный разлом, цветковые структуры (рис. 1а, б) и жёлоб (рис. 1в). На финальной стадии процесса всегда формируется магистральный разлом, но на первых этапах сдвига основания формируются опережающие разломы (цветковые структуры) или наклонные сопряжённые разломы в виде жёлоба. На рис. 1а показана заключительная стадия, когда уже образовался зигзагообразный магистральный разлом. Опережающие структуры в плане соответствуют полосам Риделя – R-сколам, а в вертикальном сечении (рис. 1б) имеют характерную форму цветковых структур.

Было проведено параметрическое исследование влияния на форму структур толщины осадочного чехла, упругих модулей и пластических свойств. Изучено формирование структур на начальном этапе сдвига в основании, изменение главных напряжений и главных осей. На величину интенсивности касательных напряжений влияет коэффициент Пуассона – чем он выше, тем ниже разница между вертикальными и горизонтальными напряжениями. Затем, с ростом сдвига блоков основания, играет роль эффективная прочность среды. При низкой прочности формируется вертикальный разлом или наклонные разломы (жёлоб). При достаточно высокой прочности, происходит поворот главных осей, и начинают формироваться наклонные структуры, повернутые относительно оси разлома, и в дальнейшем формируются цветковые структуры. Кроме этого показано, что для слабokonсолидированных пород в приповерхностных слоях начинает формироваться эшелонированная система полос Риделя. И затем происходит взаимодействие поверхностных и глубинных разломных систем. Для прочных пород поверхностная разломная система не развивается, а система, формирующаяся в вершине разлома, имеет более низкие углы наклона разломов, близкие к полосам Риделя.

*Математическая модель, алгоритмы моделирования и обработки результатов разработаны в рамках госзадания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0002. Постановка задачи и интерпретация результатов проведены в рамках госзадания ИНГТ СО РАН, проект ФНИ FWZZ-2022-0021.*

- [1] Nigel H. Woodcock, Mike Fischer Strike-slip duplexes // *J. Struct. Geol*, 1986, Vol. 8, No. 7, p. 725–735.
- [2] Hancock P.L. Brittle micro tectonics: principles and practice // *J. Struct. Geol*, 1985, Vol. 7, No. 3–4, p. 437–457.
- [3] Sylvester G. Strike-slip faults // *Geol. Soc. Am. Bull*, 1988, Vol. 100, No. 31, p. 1666–1703.
- [4] Harding T.P Seismic characteristics and identification of negative flower structures, positive flower structures, and positive structural inversion // *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull*, 1985, Vol. 69, No. 4, p. 582–600.
- [5] Stefanov Yu.P., Bakeev R.A. Deformation and fracture structures in strike-slip faulting // *Eng. Fract. Mech*, 2014, Vol. 129, p. 102–111.
- [6] Stefanov Yu.P., Bakeev R.A., Rebetsky Yu.L., Kontorovich V.A. Structure and formation stages of a fault zone in a geomedium layer in strike-slip displacement of the basement // *Phys. Mesomech*, 2014, Vol. 17, No. 3, p. 204–215.
- [7] Stefanov Yu.P., Bakeev R.A. Formation of flower structures in a geological layer at a strike-slip displacement in the basement // *Izv. Phys. Solid Earth*, 2015, Vol. 51, No. 4, p. 535–547.
- [8] Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние слоя при продольном сдвиге // *Изв. АН СССР. Физ. Зем.*, 1988, № 9, с. 29–35.
- [9] Braun J. Three-dimensional numerical simulations of crustal-scale wrenching using a non-linear failure criterion // *J. Struct. Geol*, 1994, Vol. 16, No. 8, p. 1173–1186.
- [10] Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // *Quart. Appl. Math*, 1952, Vol. 10, p. 157–165.
- [11] Nikolaevskii V.N. Constitutive equations for plastic deformation of a loose medium // *J. Appl. Math. Mech*, 1971, Vol. 35, No. 6, p. 1070–1082.
- [12] Wilkins M. L. Computer simulation of dynamic phenomena // *Computer Simulation of Dynamic Phenomena*. – Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag, 1999, 246 p.

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ НА ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Р.А. Бакеев<sup>1,2</sup>, Ю.П. Стефанов<sup>2,1</sup>, Е.А. Мельник<sup>2</sup>, В.Д. Суворов<sup>2</sup>,  
А.А. Татаурова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томск, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

<sup>2</sup> Новосибирск, Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука СО РАН, [yu\\_st@mail.ru](mailto:yu_st@mail.ru)

В настоящее время остается открытым вопрос о влиянии на напряженно-деформированное состояние сферичности Земли при рассмотрении процессов деформации для литосферы. В литературе чаще всего рассматривают плоское приближение разрезов литосферы, которое не всегда может быть использовано при геомеханическом моделировании. В то же время для оценки напряженного состояния литосферы возможны постановки задач, учитывающие сферичность Земли. В таких постановках соотношение между горизонтальными и вертикальными напряжениями принципиально отличается от плоского случая. Данные измерений соотношения между горизонтальными и вертикальными напряжениями имеют большой разброс, нередко наблюдается превышение горизонтальных напряжений над вертикальными, которое не всегда объясняется тектоническими условиями.

В работе рассмотрено влияние геометрии постановки задачи на напряженно-деформированное состояние. На основе проведенного моделирования можно выделить несколько основных факторов влияющих на напряженно-деформированное состояние и различия решений, полученных в рамках плоской и цилиндрической постановок. В цилиндрической и сферической постановках соотношение между горизонтальными и вертикальными компонентами напряжений нелинейно меняется с глубиной, оно зависит от глубины неподвижной нижней границы, а также упругих модулей и сдвиговой прочности среды. От этих параметров зависит и толщина верхнего слоя, где горизонтальные напряжения больше вертикальных.

В то же время, неоднородность строения среды определяет распределение напряженно-деформированного состояния, локальные аномалии и зоны развития необратимой деформации. При этом развитие необратимой деформации существенным образом зависит как от неоднородности среды, так и от геометрической постановки задачи. Учет криволинейности в цилиндрической постановке приводит к появлению сжимающих горизонтальных напряжений в земной коре и их более высокий уровень по всей глубине.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИНГГ СО РАН, проект ФНИ FW-ZZ-2022-0021.*

## ГРЯЗЕВОЙ ВУЛКАНИЗМ КЕРЧЕНСКО-ТАМАНСКОЙ ОБЛАСТИ КАК ОТРАЖЕНИЕ АКТИВНЫХ НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Д.Е. Белобородов<sup>1</sup>, Т.Ю. Тверитинова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Москва, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
beloborodov@ifz.ru,

<sup>2</sup> Москва, Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Грязевулканический вулканизм Керченско-Таманской области связан с наличием в осадочных кайнозойских комплексах закономерно расположенных зон концентраций складчато-разрывных деформаций различного кинематического типа. Крупные основные грязевулканические центры тяготеют к узлам пересечения разноориентированных зон сжатия с секущими дизъюнктивными системами сдвиго-раздвигового типа. В этих узлах проявляется обстановка локального растяжения, возникают газово-флюидные потоки, приводящие к формированию грязевулканических каналов. Литологическая неоднородность и стратификация кайнозойских толщ определяют сложное развитие грязевулканических каналов и формирование вблизи поверхности структур центрального типа – грязевулканических построек купольно-вдавленной морфологии.

Диапировые антиклинали и их системы являются главными зонами деформации сжатия. В северной части Таманского п-ова они ориентированы преимущественно широтно, в юго-западной имеют северо-восточное простирание, на востоке (вблизи замыкания Кавказского орогена) – северо-западное.

Грязевулканические проявления на Таманском п-ове, как и на Керченском, связаны с зонами концентрации деформаций сжатия и сдвига, выраженных системами кулисно расположенных субширотных диапировых антиклиналей или их систем. Формирование субширотных складчатых структур определялось действием главного поля напряжений с субмеридиональной ориентировкой оси максимального сжатия. Это поле напряжений характерно для всего Крымско-Кавказского региона, что неоднократно описывалось в тектонофизических работах [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Оно проявляется также в формировании диагональных зон концентраций деформаций – преимущественно правосдвиговых северо-западной ориентировки и левосдвиговой северо-восточной.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания ИФЗ РАН.*

- [1] Маринин А.В., Расцветаев Л.М. Структурные парагенезы Северо-Западного Кавказа // Проблемы тектонофизики. К сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН, ИФЗ РАН М, 2008, с. 191–224.
- [2] Попков В.И., Бондаренко Н.А., Семинихина Ю.Ф., Харченко Т.Н. Структурная геология Северо-Западного Кавказа // ГеоИнжиниринг. Аналитический научно-технический журнал, 2007, № 1 (3), с. 46–50.

- [3] Расцветаев Л.М., Корсаков С.Г., Тверитинова Т.Ю., Семенуха И.Н., Маринин А.В. О некоторых общих особенностях структуры и тектодинамики Северо-Западного Кавказа // Проблемы геологии, полезных ископаемых и экологии юга России и Кавказа. Т. 1. Новочеркасск: 1999, с. 69–73.
- [4] Расцветаев Л.М., Маринин А.В., Тверитинова Т.Ю. Дизъюнктивные системы и новейшая геодинамика Северо-Западного Кавказа // Общие и региональные проблемы тектоники и тектодинамики. Т. 2. М.: ГЕОС, 2008, с. 147–153.
- [6] Расцветаев Л.М., Маринин А.В., Тверитинова Т.Ю. Позднеальпийские дизъюнктивные системы и геодинамика Западного Кавказа // Физика Земли, 2010, том 5, с. 31–40.

## СТРУКТУРНАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ СПРЕДИНГОВЫХ ХРЕБТОВ ПРИАНТАРКТИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКИ

В.А. Боголюбский, Е.П. Дубинин, А.Л. Грохольский

Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова,  
bogolubskiyv@yandex.ru

Регион исследования располагается в южной части Атлантического океана. Он начал своё развитие с распада гондванских материков, в результате чего заложились система трёх спрединговых хребтов, которая претерпевала изменения на протяжении истории. Главными структурными особенностями региона исследования являются Южный сегмент Срединно-Атлантического хребта (ЮСАХ), Юго-Западно-Индийский (ЮЗИХ) и Американско-Антарктический (ААХ) спрединговые хребты, соединяющиеся в зоне тройного соединения Буве ( $54^{\circ}45'$  ю.ш.,  $1^{\circ}$  з.д.).

Юго-Западно-Индийский хребет отличается ультрамедленными скоростями спрединга ( $\sim 16$  мм/год). В его пределах имеются как участки ортогонального, так и косоугольного спрединга. Западная часть хребта находится под влиянием термической аномалии горячей точки Буве. Для этой же части характерно наличие трансформных разломов (с запада на восток: Буве, Айлос-Оркадас, Шака). Рельеф рифтовой зоны приближен к медленноспрединговым хребтам, а на отдельных участках – к среднеспрединговым. В восточной части хребта трансформные разломы отсутствуют, однако, на фланговых зонах в рельефе и магнитном поле прослеживаются их пассивные следы. Здесь рифтовая долина характеризуется значительным расчленением, в ряде случаев наблюдается амагматичный («сухой») спрединг [1].

Южная часть Срединно-Атлантического хребта характеризуется медленными скоростями спрединга ( $32\text{--}36$  мм/год), располагаясь субортогонально к направлению растяжения. В своей южной части он находится под влиянием горячих точек Шона и Буве. Как следствие, для южной части отмечается морфология осевого поднятия, нехарактерная для медленноспрединговых хребтов. По-видимому, с этим же фактором связано и ограниченное развитие трансформных разломов. В северной же части наблюдается типичная морфология рифтовой долины с хорошо развитыми трансформными разломами [2].

Американско-Антарктический хребет расположен на эйлеровой широте, он отличается ультрамедленным спредингом ( $\sim 18$  мм/год) и включает короткие косые и субортогональные направлению растяжения спрединговые сегменты, соединённые длинными трансформными разломами, наиболее крупным из которых является трансформный разлом (ТР) Буллард ( $540$  км). На юге Южно-Сандвичевым ТР длиной  $360$  км хребет соединяется с одноимённой зоной субдукции [3].

Для воспроизведения условий современного структурообразования спрединговых хребтов было проведено физическое моделирование, проводившееся на базе лаборатории Музея Землеведения МГУ имени М. В. Ломоносова. Экспериментальная установка включает текстолитовую ванну, поршень, растягивающий модельное

вещество, и систему внутреннего нагрева. Модельное вещество представляет собой смесь парафина, вазелина и церезина. Его свойства удовлетворяют критерию подобия океанической литосферы, включающему в себя плотность материала, его толщину и предел прочности на сдвиг [4].

После плавления вещества в установке его верхний слой охлаждается вентилатором и по достижении необходимой толщины корки застывшего вещества (модельной литосферы) начинается её растяжение с помощью поршня. Вещество обладает упруго-вязко-пластичными свойствами и при определённых значениях температуры и скорости растяжения ведёт себя как хрупкое или пластичное тело. Деформации модельной литосферы определяются толщиной хрупкого слоя  $H$  и шириной ослабленной зоны разлома  $W$  [4]. При моделировании были использованы новые методики визуализации результатов физического моделирования, включающие построение цифровой модели рельефа эксперимента и фиксацию температурного поля эксперимента с помощью тепловизора InfiRay T3S.

Моделирование условий двух участков ЮЗИХ проводилось в двух различных сериях экспериментов. Первая серия экспериментов проводилась при нормальной температуре модельного вещества ( $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), тогда как во второй серии температура была увеличена до  $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Конфигурация модели в обеих сериях была одинаковой: она включала в себя ортогональный и косой к направлению растяжения разрезы, которые отражали формирование структуры ЮЗИХ при ортогональном и косом спрединге.

В случае нормального прогрева модельного вещества модельный хребет приобрёл черты типичного ультрамедленного спредингового хребта: для него характерен расчленённый рельеф, глубокая рифтовая долина и стабильное положение оси растяжения. На оси хребта образовывались лишь небольшие и нестабильные не-трансформные смещения. При повышенном нагреве модельного вещества морфология модельного СОХ была близка к медленносрединговой. По сравнению с предыдущей экспериментальной серией наблюдался менее расчленённый рельеф и более частые перескоки оси спрединга. В ходе эксперимента для косого сегмента модельного СОХ наблюдалось формирование нескольких коротких трансформных разломов, которые, тем не менее, длительное время сохранялись в рельефе модели и, в отличие, от предыдущей экспериментальной серии характеризовались пониженными значениями температурного поля в сравнении со спрединговыми сегментами. Полученные результаты показывают, что повышенный прогрев литосферы СОХ с ультрамедленными скоростями спрединга может действительно способствовать образованию стабильных трансформных разломов, а их дальнейшее развитие может зависеть от положения магматической камеры. Однако полученные модели не отражают влияние серпентинизации на формирование трансформных разломов и её роль при последующем развитии СОХ, что требует дальнейших исследований.

При моделировании ААХ изначальная конфигурация модели представляла собой две косые к направлению растяжения ослабленные зоны: первая наклонена под углом  $70^{\circ}$ , имитируя южную часть Срединно-Атлантического хребта, вторая – под углом  $30^{\circ}$ , воспроизводя ААХ в момент изменения направления растяжения около 20 млн лет назад.

В ходе растяжения ослабленная зона модельного ААХ была расколота субпараллельной её простиранию трещиной, сформировавшей косой рифт. Постепенно

в пределах косоугольного рифта начали образовываться трансформные разломы в виде протяжённых трансформных зон, соединяющих косые спрединговые сегменты, которые постепенно становились более параллельными направлению растяжения, что, по-видимому, привело к переходу косых спрединговых сегментов в ортогональные, в пределах которых выделяются отдельные нетрансформные смещения. Процесс также сопровождался изменением рисунка трансформных разломов: часть из них, более коротких, перешла в нетрансформные смещения, другие же, напротив, увеличили свою протяжённость, что отражает сходство с вышеописанным структурным планом ААХ. Заметными являются также изменения в рельефе и термической структуре модели: при переходе косых сегментов в ортогональные уменьшаются ширина и глубина рифтовой долины, а область повышенных температур локализуется в более узкой области. Это позволяет сделать выводы о большей энергетической эффективности системы ортогональных спрединговых сегментов и трансформных разломов по сравнению с системой косых сегментов разной степени наклона. На заключительной стадии эксперимента сохранился лишь небольшой участок косоугольного спрединга. В настоящее время на ААХ сегменты с углом наклона 45–50° также составляют незначительную часть суммарной протяжённости хребта. Причём их присутствие характерно лишь для восточной части ААХ, находящейся под термическим влиянием горячей точки Буве.

В случае с ЮСАХ изначальная конфигурация модели представляла собой ослабленную зону шириной 3 см, наклонную к направлению растяжения под углом 70°. При этом, при охлаждении ослабленной зоны был задан боковой нагрев в нижней части модели, что позволило создать термическую аномалию, постепенно уменьшающуюся вдоль по ослабленной зоне.

В начале растяжения ослабленная зона была расколота трещиной. В верхней части модели она имела отчётливые очертания, была нарушена небольшими поперечными смещениями, представлявшими собой нетрансформные смещения или небольшие ТР. При движении вниз очертания трещины становились менее ровными, а поперечные нарушения представляли собой перекрытия центров спрединга, образовывавшиеся как при расколе изначальной литосферы ослабленной зоны, так и на новообразованной модельной литосфере. При отключении бокового нагрева произошёл постепенный переход перекрытий центров спрединга в нетрансформные смещения и в некоторых случаях – в трансформные разломы, а сами перекрытия продолжили существовать лишь в нижней части модели. На ЮСАХ наблюдаются аналогичные изменения в пределах осевой части хребта: в южной части характерно преобладание осевого поднятия с большим количеством перекрытий, тогда как в центральной части преобладает типичный медленноспрединговый рельеф с трансформными разломами. Между этими двумя участками наблюдается переходная зона с косыми поперечными нарушениями.

Таким образом, проведённое физическое моделирование показало большое разнообразие геодинамических факторов, влияющих на формирование сегментации современных спрединговых хребтов. Ведущими факторами формирования и преобразования структуры являются воздействие термических аномалий и изменение направления растяжения. Влияние термических аномалий проявлено на всех трёх спрединговых хребтах, создавая структурную и морфологическую дифференциацию провинций в их пределах. Изменения направления растяжения в большей степени

затронули Американско-Антарктический хребет. Для каждой рассмотренной структуры выделяются уникальные локальные геодинамические факторы, связанные с эволюцией отдельных структур, а также с серпентинизацией.

- [1] Sauter D., Cannat M. The Ultraslow Spreading Southwest Indian Ridge // *Diversity of Hydrothermal Systems On Slow Spreading Ocean Ridges*, 2010, v. 188, p. 153–174.
- [2] Lawver L.A., Dick H.J.B. The American-Antarctic Ridge // *Journal of Geophysical Research*, 1983, v. 88 (B10), p. 8193–8202.
- [3] Чупахина А.И., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л., Рыжова Д.А., Булычев А.А. Физическое моделирование сегментации осевой зоны южного сегмента Срединно-Атлантического хребта // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*, 2022, № 3, с. 89–98.
- [4] Shemenda A.I., Grocholsky A.L. Physical modeling of slow seafloor spreading // *J. Geophys. Res.*, 1994, v. 99, p. 9137–9153.

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ И СЕЙСМОТЕКТОНИКА ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ: ЭФФЕКТ ДАЛЬНОГО ТЕКТОНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИНДО-ЕВРАЗИЙСКОЙ КОЛЛИЗИИ

М.М. Буслов

Новосибирск, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
buslov@igm.nsc.ru

После работы [1] геоморфология горных систем и неотектоника Центральной Азии стали рассматриваться как результат внутриконтинентальных деформаций, связанных с воздействием тектонических напряжений от Индо-Евразийской коллизии. Позже было показано, что деформации распространились внутрь Евразии до Забайкалья на расстояние до 6 тыс. км. Выявление геодинимических и геомеханических условий формирования столь колоссальной по размерам зоны деформаций являются ключевыми в понимании глобального процесса внутриконтинентального орогенеза и связанной с ним сейсмичностью.

Индийский континент вдавлен внутрь Евразии на расстояние более 900 км, а его фронтальная часть по данным сейсмотомографии погрузилась на расстояние более чем 1500 км и наблюдается под Таримом [2]. Этими параметрами определяется колоссальная мощность коллизионного воздействия Индо-Евразийской коллизии на континентальную литосферу Центральной Азии (рис. 1).

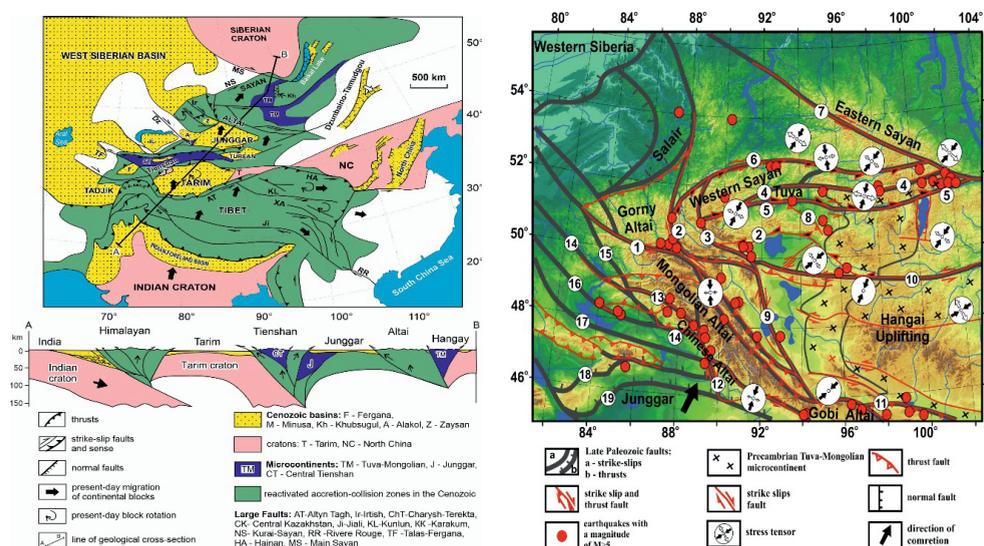


Рис. 1. Неотектоническая структура Центральной Азии и схема локализации эпицентров катастрофических землетрясений с магнитудой  $M \geq 5$  на территории Джунгарии, Алтая, Саян, Тувы и Монголии [3, 6, 8].

В настоящее время получены обширные геофизические и геолого-геохронологические данные, которые показывают, что формирование кайнозойской структуры Памира, Тянь-Шаня, Алтае-Саянского региона и Забайкалья происходило в результате передачи деформаций на дальние расстояния по «принципу домино» через жесткие структуры докембрийских микроконтинентов (Таримский, Центрально-Тяньшаньский (Иссык-Кульский), Или-Джунгарский и Тувино-Монгольский), расположенных в палеозойско-мезозойских складчатых зонах [2–7]. В результате сжатия складчатые зоны перерастают в горные системы, а микроконтиненты служат фундаментом для формирования кайнозойских бассейнов, затем могут быть вовлечены в поднятия.

Геолого-геофизические данные и моделирование результатов низкотемпературной термохронологии [3–14] подтверждают модель прогрессивного роста горных систем Центральной Азии с юго-запада на северо-восток. В Гималаях и Тибете, по данным низкотемпературной термохронологии, активные поднятия начались 30–25 млн лет назад; на Памире и Тянь-Шане – 18–8 млн лет назад; в Джунгарии, Алтае-Саянском регионе, Туве, Прибайкалье и Забайкалье в 7–5 млн лет назад. Скорость горообразования стала наиболее высокой начиная с позднего кайнозоя (последние 7–5 млн лет), когда деформации от коллизионного давления Индии дошли до крупных упоров Тувино-Монгольского микроконтинента и Сибирского кратона. В результате образовалась самая крупная и высокая горная система Центральной Азии, характеризующаяся проявлением многочисленных и мощных очагов землетрясений.

Киргизский Тянь-Шань и Алтае-Саянский регион показывают особый режим литосферной деформации, включающий как литосферное сгибание (волнообразное складкообразование), так и образование разломов в верхней коре [7]. Геологические и термохронологические исследования показывают, что после складкообразования начинают реактивировать региональные разломы, происходит быстрый рост горных систем, который сопровождается активной сейсмичностью.

В неоген – четвертичное время на формирование структуры и геодинамики Тянь-Шаня действовали два фактора: надвигание Памира и поддвигание Таримской плиты. Они создали различные структурно-геодинамические провинции, разделенные зоной Таласо-Ферганского разлома. На Памире и Западном Тянь-Шане, находившимся вблизи давления Пенджабского “индентора”, деформации проявились в форме сдвига-надвигов, надвигов и складок северо-западной вергентности. Восточнее Таласо-Ферганского правостороннего сдвига общее северное направление сжатия со стороны Тарима вызвало поднятие Тянь-Шаня преимущественно по надвигам и сдвиго-надвигам северной и северо-восточной вергентности. В плиоцен-четвертичное время деформации проявились в форме сдвигов и сдвиго-надвигов к северо-востоку от Тянь-Шаня и сконцентрировались в Алтае-Саянской горной области по обрамлению Тувино-Монгольского микроконтинента.

В работе [8] сделан анализ результатов реконструкций полей напряжений и тектонических деформаций в зонах активных разломов Монгольского и Гобийского Алтая, Северо-западной Монголии, Хангайского поднятия, Западных и Восточных Саян, Байкальской активной зоны (рис. 1). Показано, что деформации связаны с генеральным северо-северо-восточным коллизионным сжатием концентрируются по периферии Хангайского свода. При этом максимальное сжатие сосредоточено

на ее западной и южной границах, формируя, соответственно, право- и левосторонние транспрессивные структуры Монгольского и Гобийского Алтая. Относительная жесткость Хангайского свода, обусловлена формированием на месте докембрийского Тувино-Монгольского микроконтинента.

Региональные разломы по-разному отреагировали на проявление общего север-северо-восточного сжатия. Большинство зон разломов или их сегментов, ориентированных под углом к сжатию, активизировались с проявлением сдвиговой и сдвигово-надвиговой компонент (Горный Алтай, Восточные и Западные Саяны). Зоны разломов, ориентированные к сжатию перпендикулярно, были активизированы как надвиги (Монгольский Алтай, Гоби Алтай, Тува).

Крупные землетрясения с магнитудой  $M > 5$  на территории южной Сибири и Монголии локализуются как в зонах региональных разломов, так и по обрамлению жестких структур Сибирского кратона и Тувино-Монгольского микроконтинента. При этом наибольшая их концентрация наблюдается в зонах торцового сочленения древних разломных структур. К числу подобных структур относятся зоны сочленения Кузнецкого и Северо-Саянского позднепалеозойских разломов на Горном Алтае, Предалтайского и Северо-Хангайского разломов в северо-западной Монголии (район оз. Уб-Зунур), Шапшальского и Саяно-Тувинского разломов на юго-западе Западного Саяна и Северо-Саянского и Главного Саянского разломов Восточных Саянах (к северу от оз. Хубсугул). Локализация крупных землетрясений в Восточных Саянах характеризуется также совмещением разломных зон по обрамлению таких крупных тектонических структур как Сибирский кратон и Тувино-Монгольский микроконтинент. Следует отметить, что южнее крупные землетрясения локализуются по обрамлению “жесткой” структуры Тувино-Монгольского микроконтинента, нарушенного позднепалеозойскими региональными разломами в Туве (Мондинский разлом), Центральной Монголии (Северо-Хангайский разлом) и Гоби Алтае (Гоби-Алтайский разлом). Только небольшая часть крупных землетрясений локализуется в Монгольском Алтае, где в результате регионального сжатия позднепалеозойские разломы реактивированы преимущественно как надвиги.

Для Тянь-Шаня также выявлена закономерность локализации крупных землетрясений с магнитудой  $M > 6$  в сочленениях разломных зон и особенно по обрамлению Иссык-Кульского докембрийского микроконтинента [4].

Таки образом, в результате реактивации неоднородной земной коры Центральной Азии по «принципу домино» через жесткие структуры докембрийских микроконтинентов, связанной с дальним воздействием Индо-Евразийской коллизии, сформировались горные системы Центральной Азии и проявилась высокая сейсмичность. Она сконцентрирована, преимущественно, в зонах торцовых сочленений региональных разломных зон и по обрамлению гомогенных “жестких” докембрийских континентальных блоков. Выявленные закономерности реактивации неоднородной земной коры Центральной Азии позволяют целенаправленно проводить научные исследования, в том числе моделирование сейсмических процессов и рисков.

*Исследования выполнены в рамках планов НИР ИГМ СО РАН (неотектоника) и финансовой поддержке РФФ (грант 22-17-00038) (геохронология).*

- [1] Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision // *Science*, v. 189, p. 419–426.
- [2] Забелина И.В., Кулаков И.Ю., Буслов М.М. Выявление глубинных механизмов горообразования Киргизского Тянь-Шаня по результатам сейсмической томографии // *Геология и геофизика*, 2013, т. 54(7), с. 906–920.
- [3] Dobretsov N.L., Buslov M.M., Delvaux D., Berzin N.A., Ermikov V.D. Meso- and Cenozoic tectonics of the Central Asian mountain belt: effects of lithospheric plate interaction and mantle plumes // *International Geol. Rev.*, 1996, v. 38, p. 430–466.
- [4] Buslov M.M., De Grave J., Bataleva E. A.V., Batalev V.Yu. Cenozoic tectonic and geodynamics in the Tian Shan: synthesis of geology and geophysical data // *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, v. 29, p. 205–214.
- [5] De Grave J., Buslov M.M., Van den Haute P. Intercontinental deformation in Central Asia: distant effects of India – Eurasia convergence revealed by apatite fission-track thermochronology // *Himalayan Journal of Sciences*, 2004, v. 21(41), p. 121–122.
- [6] Добрецов Н.Л., Буслов М.М., Василевский А.Н., Жмодик С.М., Котляров А.В. Первые итоги и перспективы нового подхода к исследованию активных геологических процессов с использованием космических и наземных инструментальных измерений (на примере Камчатки и Центрально-Азиатского горного пояса) // *Геология и геофизика*, 2021, т. 62 (1), с. 58–84.
- [7] Delvaux D., Moyes R., Stapel G., et al. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting // *Tectonophysics*, 1997, v. 282, p. 1–38.
- [8] Buslov M.M., Imaeva L.P. Neotectonics of the Altai-Sayan Mountains and reactivation of regional faults controlling seismicity // *Earth Science Frontiers*, 2021, v. 28 (5), p. 301–319.
- [9] De Grave, J., Glorie, S., Ryabinin, A., et al. Late Palaeozoic and Meso-Cenozoic tectonic evolution of the southern Kyrgyz Tien Shan: constraints from multimethod thermochronology in the Trans-Alai, Turkestan-Alai segment and the southeastern Fergana Basin // *J. Asian Earth Sci.*, 2012, v. 44, p. 149–168.
- [10] De Grave, J., De Pelsmaeker, E., Zhimulev, et al. Meso-Cenozoic building of the northern central Asian orogenic belt: thermotectonic history of the Tuva region // *Tectonophysics*, 2014, v. 621, pp. 44–59.
- [11] Gillespie, J., Glorie, S., Jepson, G. et al. Differential exhumation and crustal tilting in the easternmost Tianshan (Xinjiang, China), revealed by low-temperature thermochronology. // *Tectonics*, 2017, v. 36, p. 2142–2158.
- [12] Glorie, S. and De Grave, J. Exhuming the Meso-Cenozoic Kyrgyz Tianshan and Siberian Altai-Sayan: a review based on low-temperature thermochronology // *Geoscience Frontiers*, 2016, v. 7, p. 155–170.
- [13] Jolivet, M., Ritz, J.F., Vassallo, R. et al. Mongolian summits: an uplifted, flat, old but still preserved erosion surface // *Geology*, 2007, v. 35, p. 871–874.
- [14] Jolivet M., De Boisgrollier T., Petit C. et al. How old is the Baikal Rift Zone? Insight from apatite fission track thermochronology // *Tectonics*, 2009, v. 28, TC3008.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ  
ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ГОРНЫХ ПОРОД РЕГУЛЯРНО-БЛОЧНОЙ СТРУКТУРЫ**

**Н.А. Голиков<sup>1</sup>, Л.А. Назаров<sup>1</sup>, А.А. Скулкин<sup>1</sup>, Л.А. Назарова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Новосибирск, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия, golikovna@ipgg.sbras.ru*

<sup>2</sup> *Новосибирск, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН*

Многие угольные [1] и нефтяные пласты [2] имеют слоистую структуру, когда порода с межзерновой пористостью рассечена на блоки горизонтальными трещинами. При этом проницаемость слоев  $k_m$  много меньше проницаемости макротрещин  $k_f$  при небольшом уровне вертикального напряжения [3]. Зависимость  $k_m$  от сжимающих напряжений [4] определяется в лабораторных условиях стандартными методами [5]. В экспериментах по измерению  $k_f$  используют образцы с одиночным нарушением сплошности с известными параметрами трещин [6]. Использование полученных данных на реальный массив слоистых горных пород требует дополнительного анализа [7].

Возникает необходимость проведения экспериментальных определений проницаемости блочных пород в зависимости от приложенных напряжений с одновременным измерением деформационных характеристик.

В работе описана экспериментальная установка для определения деформационных и фильтрационных свойств трещин на образцах блочной структуры и приведены результаты экспериментов на искусственных образцах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант 23-27-00339 от 13.01.2023.*

- [1] Thomas L.J., Thomas L.P. Coal Geology. John Wiley & Sons, 2002, 384 p.
- [2] Коллекторы нефтей Баженовской свиты Западной Сибири / под ред. Дорофеевой Т.В. – Л.: Недра, 1983, 131 с.
- [3] Rutqvist J., Liu H.-H. A new coal-permeability model: internal swelling stress and fracture–matrix interaction // Transport in Porous Media, 2010, V. 82, p. 157–171.
- [4] Lv R., Xue J., Zhang Z. et al. Experimental study on permeability and stress sensitivity of different lithological surrounding rock combinations // Frontiers in Earth Science, 2022, V. 9. [https://doi: 10.3389/feart.2021.762106](https://doi.org/10.3389/feart.2021.762106).
- [5] ГОСТ 26450.2–85. Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации.
- [6] Blocher G., Kluge C., Milsch H. et al. Permeability of matrix–fracture systems under mechanical loading—constraints from laboratory experiments and 3-D numerical modeling // Advances in Geosciences, 2019, V. 49, p. 95–104.
- [7] Zhou Z., Zhang J., Cai X. et al. Permeability experiment of fractured rock with rough surfaces under different stress conditions // Geofluids, 2020, V. 2020. – Article ID 9030484. <https://doi.org/10.1155/2020/9030484>.

## СМОЖЕТ ЛИ РАСПРЕДЕЛЁННОЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ (DAS) ЗАМЕНИТЬ КЛАССИЧЕСКИЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ?

**В.В. Гравиров**

*Москва, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
gravirov@mail.ru*

Распределенное акустическое зондирование (DAS) сегодня переживает экспоненциальный рост своего применения и развития. Однако, следует отметить, что до сих пор, тем не менее существуют определенные трудности в применении этой технологии для решения широкого круга сейсмологических задач [1].

В общем виде DAS функционирует как комплекс виртуальных сейсмических датчиков, располагающихся по направлению прокладки использованного волоконно-оптического кабеля. Это требует проведения для каждого виртуального датчика большого объема предварительных работ по определению его положения, ориентации, передаточной функции, собственного шума и т.д. Конечно, часть подобных метрологических характеристик можно оценить заранее, если известен тип кабеля, глубина и способ его прокладки, тип грунта и его уплотнение, а также местные условия в зоне прокладки кабеля.

Решение перечисленных предварительных метрологических задач требует создания и формулирования комплексного и единого набора параметров DAS, стандартизации методов их описания и процесса подготовки работ, измерений и представления данных [2]. Разумеется, подобные работы уже находятся в активной фазе разработки. Так, например, большая работа в этом направлении была проделана при подготовке к месяцу мониторинга «Global DAS» [3], который состоялся в феврале 2023 г. В ходе проведения этого эксперимента первоначально предполагали, что, зная характеристики использованного оптоволоконного кабеля, свойства грунта и условия прокладки кабеля, можно будет априорно оценить основные метрологические характеристики системы DAS [4], такие как, передаточная функция, уровень шума и т. д. Это позволило бы в полной мере использовать данные DAS сразу после подключения оборудования к оптоволоконной линии связи в режиме реального времени. Но к сожалению, практика доказала, что это не совсем так.

Однородность кабеля, равномерность его прокладки по всей длине линии и одинаковые грунтовые условия давали надежду на то, что метрологические характеристики будут примерно одинаковыми по длине кабеля. Анализируя данные, полученные с оборудования подключенного к этому кабелю в течение месяца мониторинга «Global DAS» [5], особое внимание было уделено сравнению сейсмических сигналов, пришедших с разных азимутов. Для этого оптический кабель был разделен на условно прямые участки. Были определены азимуты прихода сейсмических волн на каждом участке. Это позволило определить, насколько на уровень регистрируемого сигнала могут влиять местные геологические условия на путях распространения сейсмических волн и ориентация различных участков кабеля.

Сравнение сигналов с виртуальных датчиков расположенных на разных азимутах относительно источников сейсмических сигналов показало, что амплитудная характеристика виртуальных датчиков фактически существенно меньше зависит от угла падения сейсмической волны на ось кабеля, чем предполагалось ранее расчетами. Это может быть связано, во-первых, с геологическими условиями по ходу распространения волны, и во-вторых, с возможными изгибами и поворотами внутри кабеля, в-третьих, с тем, что оптическое волокно было намотано на жилу кабеля.

Также выяснилось, что амплитудная характеристика виртуальных датчиков оказалась очень разной. При этом соседние или близлежащие датчики зачастую имели похожие характеристики. То есть очевидно, что незначительные изменения условий прокладки кабеля оказывают не столь существенное влияние на передаточную функцию виртуальных датчиков.

Таким образом на текущий момент времени технология DAS при всех своих достоинствах все еще не может составить какую-либо существенную конкуренцию классическим сейсмическим приборам, поскольку виртуальные датчики DAS обладают рядом существенных недостатков. Амплитуда их сигналов существенно зависит от угла падения и частоты регистрируемого сигнала. DAS имеет более высокий уровень шума, чем обычные широкополосные сейсмометры, а также обладает чувствительностью к изменениям температуры, влажности, давления, внешних нагрузок, промерзания/оттаивания и т.д.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.*

- [1] Kislov K.V., Gravirov V.V. Distributed acoustic sensing a new tool or a new paradigm // *Seismic Instruments*, 2022, v. 5, p. 485–508.
- [2] Никитин С.П., Кислов К.В., Старовойт Ю.О., Бенгальский Д.М., Спиридонов Е.П., Харасов Д.Р., Фомиряков Э.А., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Возможности и перспективы использования распределенных оптоволоконных датчиков в геофизике // *Приборы и техника эксперимента*, 2023, № 5, с. 153–158.
- [3] Кислов К.В., Никитин С.П. Телесеismicкий мониторинг «Глобальный месяц распределенного акустического зондирования»: опыт, современное состояние и тенденции // *Материалы VII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий»*, Республика Адыгея, Майкоп, 2023, ч. 1, с. 155–165.
- [4] Kislov K.V., Gravirov V.V. Acquisition of Seismological Data Using Fiber Optic Communication Lines // *XIV International Conference and School “Problems of Geocosmos–2022”*, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Petrodvorets, 2022, GC2022-SG008.
- [5] Jousset P., Wuestefeld A., Krawczyk C., Baird A., Currenti G., Landrø M., Nowacki A., Spica Z., Barajas S.R., Lindner F., Konca Ö.A., Edme P., Lai V.H., Treshchikov V., Urmantseva L., Morten J.P., Lienhart W., Lipovsky B.P., Schoenball M., Ma K.-F. and the “DAS-month” team: Global Distributed Fibre Optic Sensing recordings of the February 2023 Turkey earthquake sequence // *EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria*, 2023, EGU23-17618, DOI:10.5194/egusphere-egu23-17618.

**КОМПЛЕКСНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СБОРА ИНФОРМАЦИИ,  
ВКЛЮЧАЮЩАЯ В СВОЙ СОСТАВ ПРЕЦИЗИОННЫЙ МОНИТОРИНГ  
ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРНОГО МАССИВА В НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ  
БЛИЗОСТИ ОТ МАГМАТИЧЕСКОГО ОЧАГА ВУЛКАНА ЭЛЬБРУС**

**В.В. Гравиров, Д.В. Лиходеев**

*Москва, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
gravirov@mail.ru*

Знание количественной информации о тепловом потоке из недр Земли имеет основополагающее значение для более глубокого понимания взаимосвязи между флюидно-магматическими и геодинамическими процессами. Однако, сегодня для прямых измерений глубинных температур доступны только первые километры земной коры. При этом прецизионные измерения температур зачастую затруднены ввиду присутствия повышенного уровня помех, связанных с значительными перепадами температуры воздушных масс в точках наблюдения. В ИФЗ РАН была разработана уникальная комплексная система мониторинга геофизических параметров, установленная в Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН [1], расположенной в дальней штольне Баксанской нейтринной обсерватории. В состав её оборудования помимо сейсмометра, наклономера, лазерного лидара (для измерения плотности вариаций аэрозолей в штольне), кварцевого микробарографа, также входит многоканальная система мониторинга температуры горных массивов, способная регистрировать прецизионные изменения температуры с относительной точностью порядка 0,005 °C [2]. В данный момент система температурного мониторинга осуществляет постоянное измерение температуры по 16-ти независимым каналам. Чувствительные элементы температурных датчиков установлены как внутри специально пробуренных в стене штольни 5м отверстий (для измерения температуры горного массива), так и на постаментах установки научного оборудования (для измерения температуры воздуха в штольне), а также внутри наклономера и микробарографа (для измерения внутренней температуры приборов). Установленная система температурного мониторинга продолжает модернизироваться, как с целью улучшения разрешающей способности, уменьшения шумовых составляющих сигналов температуры, так и увеличения числа каналов наблюдения [3]. Также в непрерывном режиме производится мониторинг влажности, атмосферного давления и плотности аэрозолей внутри штольни [4, 5]. Расположение Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН в непосредственной близости от магматического очага вулкана Эльбрус позволяет получать уникальные данные о структуре и динамике теплового поля в его окрестностях. Изучение этого вулкана является особенно важной задачей, как с точки зрения получения новых фундаментальных знаний о строении магматических структур, так и с точки зрения оценки вулканической опасности Эльбрусского вулканического центра, обусловленной наличием жидкого магматического расплава в недрах вулкана.

*Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФЗ РАН.*

- [1] Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Т. 2. Северокавказская геофизическая обсерватория. Создание, анализ результатов наблюдений. Москва, ИФЗ РАН, 2013, 512 с.
- [2] Лиходеев Д.В., Гравиров В.В., Кислов К.В. Прецизионные дифференциальные термометры для исследования тепловых процессов на базе Северокавказской геофизической обсерватории // Наука и технологические разработки, 2018, т. 97, № 1, с. 15–25.
- [3] Гравиров В.В., Дещеревский А.В., Кузьмин Ю.О., Лиходеев Д.В., Собисевич А.Л., Широков И.А. Развитие систем прецизионных наклонных наблюдений в условиях подземной обсерватории // Сейсмические приборы, 2022, т. 58, № 1, с. 29–52.
- [4] Лиходеев Д.В., Собисевич А.Л., Гравиров В.В. Приливные эффекты в тонкой структуре тепловых полей по результатам наблюдений в глубокой штольне Северокавказской геофизической обсерватории // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 2022, т. 503, № 2, с. 72–77.
- [5] Pershin S.M., Sobisevich A.L., Grishin M.Y., Gravirov V.V., Zavozin V.A., Kuzminov V.V., Lednev V.N., Likhodeev D.V., Makarov V.S., Myasnikov A.V., and Fedorov A.N. Volcanic activity monitoring by unique lidar based on a diode laser // Laser Physics Letters, 2020, v. 17(11), p. 115607–115613.

**СИЛЬНЫЕ ПАЛЕОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ  
И ГОЛОЦЕНОВОЕ РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЕ НА ЮГО-ВОСТОКЕ  
ГОРНОГО АЛТАЯ – СЛЕДСТВИЕ ПРОДОЛЖАЮЩЕГОСЯ  
СОКРАЩЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ**

**Е.В. Деев<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Новосибирск, Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука СО РАН,*

<sup>2</sup> *Новосибирск, Новосибирский государственный университет,  
deev1@yandex.ru*

Горный Алтай – часть системы внутриконтинентальных кайнозойских орогенов севера Центральной Азии, возникшей как отдаленный эффект коллизии Евразии и Индостана. Сокращение земной коры в его пределах, особенно усилившееся в начале четвертичного периода, сопровождается многочисленными землетрясениями. Наибольшая концентрация очагов инструментально зарегистрированных и исторических землетрясения наблюдается в юго-восточной части Горного Алтая, где находятся ключевые сейсмогенерирующие структуры. Одной из таких структур является Курайская зона разломов. В докладе представлены новые материалы палеосейсмологических исследований Курайской зоны разломов на стыке Курайской впадины с одноименным хребтом и Кубадринским массивом. На основе анализа космоснимков QuickBird, данных съемки с беспилотного летательного аппарата, структурно-геоморфологических, тренчинговых, археосейсмологических и георадиолокационных исследований выявлена и исследована серия поверхностных разрывов (разломных уступов) палеоземлетрясений, развитых вдоль разломов Курайской зоны. Возраст сформировавших разломные уступы палеоземлетрясений определен с применением радиоуглеродного датирования и дендрохронологии. В результате проведенных исследований [1] и с учетом ранее полученных данных [2, 3, 4, 5, 6] сделаны следующие основные выводы.

1. Одиннадцать голоценовых палеоземлетрясений с  $M_w = 6.5-7.6$  произошли вдоль Курайской зоны разломов: два до 7.5 тыс. л.н., три в интервале от 7.5 до 5.8 тыс. л.н. (7.0, 6.3 и 5.9–5.8 тыс. л.н.), одно событие между 5.8 и 4.6 тыс. л.н., еще четыре около 4.6, 3.2, 1.5 и 1.3–1.2 тыс. л.н., а последнее не древнее 1450–1650 гг. н.э. Временные интервалы между сильными сейсмическими событиями составили от 200 до 1700 лет.

2. Палеоземлетрясения связаны с разломами встречного падения, ограничивающими форберг перед фронтом Курайского хребта и Кубадринского массива. В основном они приурочены к северной границе форберга, где в рельефе наблюдается три разломных уступа, которые омолаживаются с юга на север. Таким образом происходит сокращение площади Акташской впадины и постепенное расширение площади форберга. Расположение разломных уступов в виде левой кулисы, а также направленное смещение каменной насыпи кургана показывает, что для разлома,

ограничивающего форберг с севера, помимо вертикальной компоненты смещения характерна и правосторонняя сдвиговая.

3. Полученные геордарные данные подтверждают сложное строение и кинематику зоны разновозрастных поверхностных разрывов до глубины 12 м.

4. Важно, что выявленные сейсмогенные разломные уступы расположены на расстоянии менее 1 км от возможного маршрута газопровода из России в Китай. Эту информацию следует учитывать при его проектировании и строительстве. Не менее важно учитывать полученные данные для оценки сейсмического режима и мейсмической опасности Юго-Восточного Алтая, где активно развивается туристическая инфраструктура.

5. Сокращение площадей внутригорных впадин и увеличение размеров растущих горных хребтов при развитии двух систем взбросов и надвигов со встречным падением является типичным механизмом сокращения земной коры не только для Горного Алтая, но и для других сейсмоактивных регионов Центральной Азии, развивающихся в обстановке региональной транспрессии.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИНГГ СО РАН (проект FWZZ-2022-0001).*

- [1] Deev E.V., Panin A.V., Solomina O.N., Bricheva S.S., Borodovskiy A.P., Entin A.L., Kurbanov R.N. Large paleoearthquakes and Holocene faulting in the Southeastern Gorny Altai: implications for ongoing crustal shortening in Central Asia // International Geology Review, 2024.
- [2] Deev E.V., Turova I.V., Borodovskiy A.P., Zolnikov I.D., Oleszczak L. Unknown large ancient earthquakes along the Kurai Fault Zone (Gorny Altai): New results of paleoseismological and archaeoseismological studies // International Geological Reviews, 2017, v. 59, p. 293–310.
- [3] Deev E.V. Localization zones of ancient and historical earthquakes in Gorny Altai // Izv Physics Solid Earth, v. 55, p. 451–470.
- [4] Deev E., Dublyansky Y., Koh S., Scholz D., Rusanov, G., Sokol E., Khvorov P., Reutsky V., Panin A. Large Holocene paleoseismic events and synchronized travertine formation: A case study of the Kurai Fault Zone (Gorny Altai, Russia) // International Geological Reviews, 2023, v. 65, p. 2426–2446.
- [5] Deev E., Borodovskiy A., Entin A. Earthquake-induced deformation at archaeological sites in southeastern Gorny Altai (Siberia Russia) // Archaeological Research in Asia, 2023. v. 34, p. 100431.
- [6] Turova I., Deev E., Pozdnyakova N., Entin A., Nevedrova N., Shaparenko I., Bricheva S., Korzhenkov A., Kurbanov R., Panin A. Surface-rupturing paleoearthquakes in the Kurai Fault Zone (Gorny Altai, Russia): Trenching and geophysical evidence // Journal of Asian Earth Sciences, 2020, v. 197, p. 104399.

## ДИСКРЕТНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ И АНОМАЛЬНО НИЗКИЕ СКОРОСТИ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Т.А. Киряева<sup>2</sup>, Б.П. Сибиряков<sup>1</sup>, В.В. Карстен<sup>1</sup>, Е.Б. Сибиряков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новосибирск, Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука СО РАН, sibiryakovbp@ipgg.sbras.ru,

<sup>2</sup>Новосибирск, Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН

Движение и равновесие в пористых и трещиноватых средах описываются дифференциальными уравнениями бесконечного порядка в силу того, что в таких средах очень большое число степеней свободы. Соответствующие дисперсионные уравнения (2) содержат дискретное множество вещественных и комплексных корней. Последние содержат катастрофические решения. Структура порового пространства описывается параметрами интегральной геометрии.

$$\frac{\partial}{\partial x_k} [P(\sigma_{ik})] = \rho \ddot{u}_i = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( E + \frac{l_0^2 v}{3!} + \frac{l_0^4 v v}{5!} + \dots \right) (\sigma_{ik}) \right] \quad (1)$$

$$\frac{\text{sink}l_0}{kl_0} = \left( \frac{k_S}{k} \right)^2. \quad (2)$$

В уравнении (1)  $P$  есть оператор приведения реального сложного тела с его сплошному образу. Он содержит единичный оператор  $E$ , а также цепочку операторов Лапласа, снабжённых степенями средних расстояний  $l_0^2, l_0^4 \dots$  от трещины до её ближайшей соседки. Уравнение (2) это дисперсионное уравнение, соответствующее (1). В нём содержится дискретное множество корней (состояний). Если  $l_0 \rightarrow 0$ , то мы имеем обычную плоскую упругую волну. Если же  $kl_0 \rightarrow \pi$ , то возникают аномально медленные волны, а при  $kl_0 > \pi$  корни становятся комплексными. Поэтому катастрофы разного масштаба являются естественным состоянием микронеоднородных сред. При этом переход от одного состояния к другому (математически от одного корня к другому) может быть только дискретным (отдельные удары). Это подтверждают, как натурные опыты, так и сейсмологические наблюдения [2, 3].

Равновесие и движение не являются абсолютными категориями, а зависят от масштаба. Равновесие в больших масштабах, не исключает его отсутствия в масштабах малых. Тем самым появляется возможность возникновения промежуточных состояний между статикой и динамикой. Классическая сплошная среда таких состояний не имеет. Поэтому может быть либо равновесие, когда катастрофы невозможны, либо динамика, когда прогноз становится бессмысленным.

Одним из важных результатов новой модели континуума, содержащего поры и трещины, является предсказание существования волн с аномально низкими скоростями порядка нескольких метров в секунду и менее. И хотя это явление предсказано в 2002 году, экспериментальное обнаружение такого рода волн как в полевых условиях, так и в лаборатории оказалось возможным только в последние годы [1].

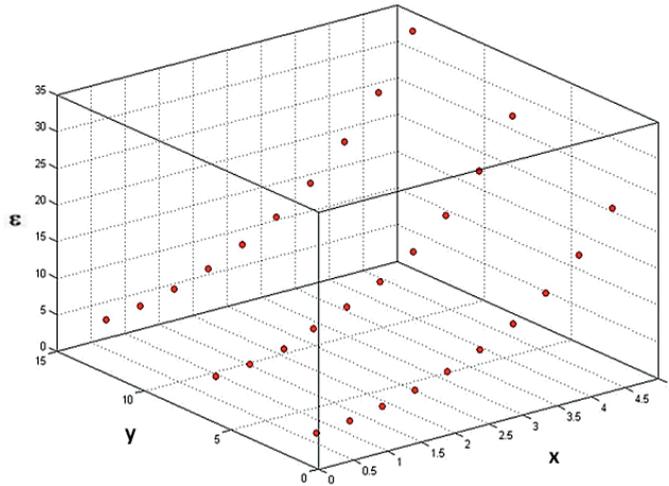


Рис. 1. Расположение корней дисперсионного уравнения (2) на комплексной плоскости. Ось X вещественные значения корней, ось Y мнимые значения. Вертикальная ось  $k_s l_0$ .

Возникает возможность более адекватного толкования закона Омори, который по своей природе имеет дискретный характер, но его обычно аппроксимируют непрерывной линией, чтобы придать физический смысл эмпирическим постоянным. Закон Омори может быть записан в дискретной форме, (формула 3) что соответствует природе вещей. Представляется весьма вероятным, что землетрясения и сейсмическая эмиссия сопровождаются постоянными изменениями мегаструктур, главным образом, удельной поверхности трещин и среднего расстояния от трещины до её ближайшей соседки.

$$f_n = \frac{c_n}{l_0} = \frac{c_0}{l_0} \frac{1}{\pi \left( \frac{3}{4} + n \right)} \quad (3)$$

В формуле (3) приведена дискретная форма закона Омори, где  $n$  – целое число,  $C_0$  – скорость движения первого афтершока,  $f_n$  – частота афтершоков, её падение с ростом номера.

Наблюдения периодов афтершоков позволяют оценить удельную поверхность не наблюдаемых трещин, если скорости обычных упругих волн в среде известны. Здесь используется формула интегральной геометрии о том, что произведение удельной поверхности  $\sigma_0$  на среднее расстояние от трещины до её ближайшей соседки  $l_0$  связано с пористостью  $f$  простым соотношением:

$$\sigma_0 l_0 = 4(1 - f) \quad (4)$$

Лабораторные опыты показывают, что медленные волны очень чувствительны к реологическому состоянию среды [1]. Их интенсивность существенно зависит от того, находится ли образец в упругом или пластическом состоянии.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИНГГ СО РАН, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.*

- [1] Опарин В.Н., Киряева Т.А., Потапов В.П., Юшкин В.Ф. Новые методы и информационные технологии в экспериментальной геомеханике / Российская академия наук, Сибирское отделение, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий. – Новосибирск, СО РАН, 2021, 291 с.
- [2] Sibiryaakov V.P., Sibiryaakov E.B. Equilibrium and dynamics of porous and cracked media // Journal of Physics: Conference Series. 9th International Conference on Lavrentyev Readings on Mathematics, Mechanics and Physics (7–11 September 2020, Novosibirsk, Akademgorodok), 2020, v. 1666, № 1.
- [3] Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. – М.: Наук, 1985, 405 с.

**ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИАЦИЙ  
ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВЕННОГО РАДОНА  
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**И.А. Козлова, А.К. Юрков, С.В. Бирюлин**

*Екатеринбург, Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,  
ikozlova75@mail.ru*

Изучение изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород дает представление о геологических процессах, протекающих в земной коре как на глобальном (движение литосферных плит), так и на региональном и локальном уровнях (формирование разрывов и складок, возникновение землетрясений). К основным видам напряженно-деформированного состояния относятся сжатие, растяжение и сдвиг.

Процесс сжатия и растяжения влияет на изменение порового пространства горных пород, что в свою очередь оказывает воздействие на выделение газовых эманаций, в частности изотопов радона. Изотопы радона, являющиеся продуктами распада радиоактивных семейств  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , уникальны для исследований тем, что присутствуют во всех горных породах и постоянно генерируются. Важное значение имеет и отсутствие накопительного эффекта у изотопов радона, что позволяет получать контрастные, хорошо выделяемые аномалии.

Определяющим процессом при формировании радонового поля в горных породах является диффузия. Известные теоретические распределения концентрации радона с глубиной для различных геологических ситуаций, в большинстве случаев хорошо согласуются с экспериментальными наблюдениями, и на сегодняшний день практически все исследователи измеряют радон, который поступает в измерительные приборы только за счет процесса диффузии. Все измерения, связанные с отбором какого-то объема почвенного воздуха (пробы), приводят к существенным (с учетом пористости) искажениям поля радона. На его восстановление требуется достаточно большое время. Этим временем уже ограничивается возможная дискретность измерения, которая может быть недостаточной при изучении влияния ряда быстроменяющихся динамических процессов.

Для изучения процесса подготовки тектонических событий был предложен режим вынужденной откачки почвенного воздуха из шпура, который позволяет заглубить точку измерения, не исказить диффузионные характеристики среды и существенно снизить влияние метеофакторов. Также при этом режиме измерений аномалии радона носят непродолжительный характер (первые сутки) и имеют характерные точки, что важно при количественной интерпретации. Еще одним немаловажным фактором для изучения процесса подготовки тектонических событий, является проведение мониторинговых наблюдений в непрерывном режиме, который, в случае использования изотопов радона, легко реализуется.

Начиная с 90-х годов прошлого столетия, в Институте геофизики УрО РАН занимаются изучением радона, как индикатора изменений напряженного состояния геологической среды. За это время было проведено большое количество экспериментальных работ на Северо-Уральском бокситовом руднике, на Тянь-Шане, на Южно-Курильском геодинамическом полигоне, на Северном Кавказе и Южном Урале [1, 2]. В настоящее время, отработана методика измерений, разработан режим принудительной доставки почвенного воздуха к детектору, получены закономерности изменения объемной активности почвенного радона при подготовке тектонических событий.

Многолетний мониторинг на Южно-Курильском геодинамическом полигоне позволил выявить закономерности вариаций радона при подготовке тектонических событий. Известно, что по всему земному шару происходит огромное количество землетрясений, поэтому для обработки и интерпретации результатов необходимо ограничивать информативную область учитываемых событий. Для некоторых геофизических методов, основанных на вариациях проницаемости и пористости горных пород при оценке радиуса предвестника применяется так называемый «геодинамический критерий» ( $K \geq 2.5$  отношение магнитуды землетрясения ( $M$ ) к логарифму расстояния от станции мониторинга до события ( $R$ )). [3] Используя критерий и учитывая, что магнитуда землетрясений, за анализируемый промежуток времени не превышала 7, определили зону проявления предвестников от землетрясений радиусом до 500 км от пункта наблюдения (о. Кунашир). За период 2011 по 2023 гг. произошло 289 землетрясений с магнитудой более 4. В ходе исследований была разработана методика выделения аномалий. В качестве аномалии на кривой ОАР рассматривался участок, на котором не менее трех значений ОАР (при измерениях каждые четыре часа) как минимум в два раза превышали фоновый уровень перед началом повышения объемной активности радона. Фоновый уровень ОАР определялся перед каждым конкретным землетрясением, так как он зависит от нескольких факторов (температура, влажность, приливные воздействия и ряд других).

После первичной обработки результатов было установлено, что для геолого-тектонических условий Южных Курил, в поле радона отражается большее количество событий, чем при применении величины критерия 2.5, поэтому был применен «геодинамический критерий» больше 2.0. Так по результатам обработки мониторинговых наблюдений за 2011–2023 годы было установлено, что 267 событиям из 289 с геодинамическим критерием от 2.0 предшествовали аномалии ОАР (что составляет 96%) (рис. 1).

Помимо определения критериев отражения тектонических событий в поле радона, было установлено, что разноудалённые от пункта наблюдения тектонические события отражаются на разных участках радоновых кривых (рис. 2а, б).

«Дальние» тектонические события происходят практически всегда после прохождения максимума аномалии ОАР на его нисходящей ветви или в самом начале плато низких значений. «Ближние» события отмечаются после выхода нисходящей ветви на плато низких значений ОАР. То есть, если событие не произошло на нисходящей ветви кривой изменения ОАР, то существует высокая вероятность того, что может произойти тектоническое событие в «ближней» зоне.

Физическим обоснованием отражения тектонических событий в поле радона может выступать характер поведения трещинно-порового пространства при изменении напряженного состояния массива в пункте наблюдения. При сжатии, которое

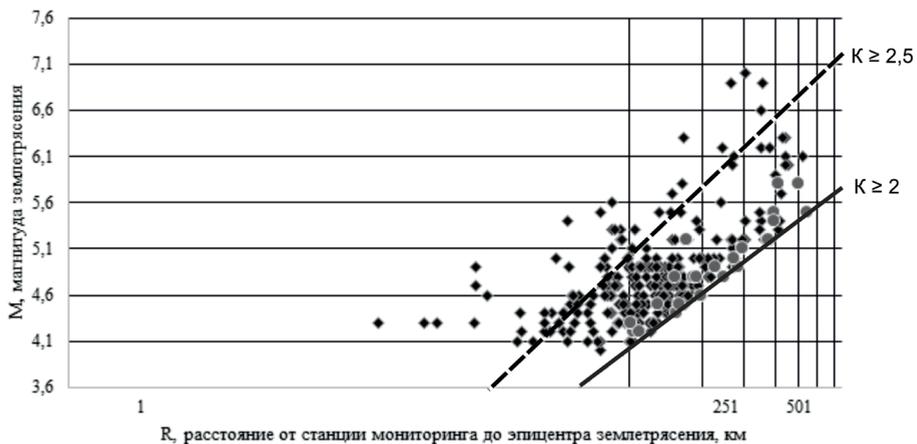


Рис. 1. Отражение землетрясений в поле ОАР по наблюдениям за 2011–2023 гг. (квадрат – подготовка землетрясений отразилась, кружок – не отразилась).

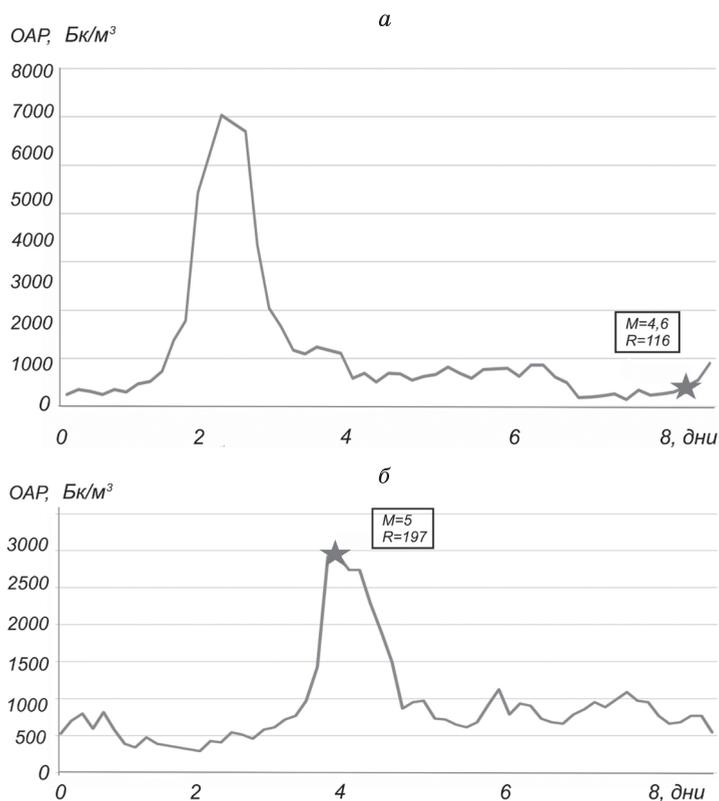


Рис. 2. Примеры отражения процесса подготовки «близких» (а) и «далеких» (2) землетрясений (звездочка – момент землетрясения).

происходит в очаге и эпицентре готовящегося землетрясения, объемная активность радона вначале увеличивается, за счет выдавливания радона из трещинно-порового пространства. Затем трещины перекрываются, ОАР соответственно, уменьшается, а далее при продолжающемся процессе сжатия происходит последовательное уменьшение ОАР. Иной механизм отвечает за образование аномалий ОАР в «дальней зоне, которая ассоциируется с растяжением. В качестве возможного механизма можно предложить снятие растягивающих нагрузок за счет интенсивного трещинообразования перед и во время землетрясения в очаге. Геологическая среда в зоне растяжения полностью или частично возвращается в исходное состояние, выдавливая радон в сообщаемое поровое пространство, который и образует аномалию в дальней зоне.

- [1] Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах // Доклады РАН, 1996, т. 346, № 2, с. 245–248.
- [2] Козлова И.А., Бирюлин С.В., Юрков А.К. Поведение аномалий объемной активности почвенного радона во время подготовки тектонических землетрясений // Литосфера. 2021, № 21(5), с. 724–733.
- [3] Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ОИФЗ АН СССР, 1991, 217 с.

## СТРУКТУРА ВЕРХНЕЙ КОРЫ ПОД ВУЛКАНОМ ЭБЕКО (О. ПАРАМУШИР) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

В.П. Комзелева<sup>1,2</sup>, И.В. Медведь<sup>1,2</sup>, И.Ю. Кулаков<sup>2,3</sup>, Т.А. Ступина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирск, Новосибирский государственный университет,

<sup>2</sup>Новосибирск, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
komzelevavp@ipgg.sbras.ru,

<sup>3</sup>Москва, Сколковский институт науки и технологий

Вулкан Эбеко, расположенный на острове Парамушир Курило-Камчатской дуги, является одним из наиболее активных вулканов, характеризующийся извержениями, в основном, эксплозивного и фреатического типа. В его недрах присутствуют гидротермально-магматические системы, взаимодействующие с интрузивными телами, которые обеспечивают питание вулкана.

В рамках настоящей работы были представлены результаты сейсмической томографии на основе объемных волн в масштабе земной коры для северной части острова Парамушир. Для анализа использовались данные, зарегистрированные временной сейсмической сетью и одной постоянной сейсмической станцией в период с 2021 по 2022 годы. Синтетические тесты подтвердили высокую разрешающую способность результатов томографии до глубины ~12 км.

Произведенное исследование позволило уточнить структуру коры под северной частью острова Парамушир. Полученные результаты демонстрируют низкоскоростные аномалии продольных волн и высокоскоростные аномалии поперечных волн под хребтом Вернадского. Сейсмическая структура под вулканом Эбеко характеризуется пониженными значениями  $V_p/V_s$ , что может быть объяснено насыщением коры флюидами в переходном состоянии жидкость/газ.

Кроме того, была выявлена низкоскоростная аномалия мощностью несколько километров между вулканами Эбеко и Крашенинниковым, что подтверждает флюидонасыщение метеорными водами разломной структуры центральной части хребта Вернадского. Была также выявлена низкоскоростная аномалия на восточном склоне в бассейне рек Птичьей и Наседкиной, что объясняется наличием флюидонасыщенного гидротермально-магматического тела, которое питает гидротермы в бассейне реки Птичьей.

На основе результатов исследования была предложена интерпретационная модель, которая может помочь в понимании сейсмической структуры и гидротермальных процессов в регионе.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России. Исследования проводились в рамках научных проектов НГУ и ИНГГ СО РАН. Работы по сейсмотомографии региона поддержаны государственным заданием по научно-исследовательскому проекту FSUS 2022-0019. Работа по интерпретации результатов поддержана государственным заданием по научно-исследовательскому проекту FWZZ-2022-0017.*

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ  
ОПЕРАТИВНОГО СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ  
С ЦЕЛЬЮ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ**

**Т.Е. Малышкин**

*Москва, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
timurmalyskin@gmail.com*

Исследование продолжает серию публикаций по разработке метода разрывных нарушений земной поверхности [1, 2, 3]. Данная работа является приложением разработанного метода к структурно-линеamentному анализу с целью определения потенциальных сейсмоопасных зон.

*Работа выполнена в рамках государственного задания РАН.*

- [1] Малышкин Т.Е., Гордеев Н.А. Критерии обнаружения разрывных нарушений, основанные на данных аэрокосмических съемок Земли // Материалы 62-й Международной научной студенческой конференции. Новосибирск, 2024, с. 15.
- [2] Малышкин Т.Е., Гордеев Н.А. Сравнение результатов дешифрирования разрывов по данным мультиспектральной съемки с космических аппаратов «Канопус-в» и «Landsat-8» с аналоговым способом дешифрирования // Материалы Всероссийской научной конференции «Динамическая геология — проблемы и достижения», посвященной празднованию 270-летия МГУ имени М.В. Ломоносова и 90-летию со дня рождения Н.В. Короновского, М.А. Гончарова и М.Г. Ломизе. Москва, 2023, с. 229–232
- [3] Молчанов А.Б., Гордеев Н.А. Автоматизация метода реконструкции неотектонических напряжений Л.А. Сим с применением алгоритмов компьютерного зрения // Труды ФНС. ГИ КНЦ РАН. Апатиты, 2021, № 18, с. 301–304.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ЭПИЦЕНТРАЛЬНЫХ ЗОН СИЛЬНЫХ КОРОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ  
ТАНГШАНЬ 27.07.1976 И АКЕТАО 25.11.2016 (КИТАЙ)**

**А.И. Маневич, В.Н. Морозов**

*Москва, Геофизический центр РАН,  
a.manevich@gcras.ru*

Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) ряда сильных континентальных землетрясений с магнитудой больше  $M 6$  позволило установить общие повторяющиеся закономерности между результатами моделирования и параметрами землетрясений. При этом в качестве «достоверных» геологических данных принимаются структурно-тектонические схемы эпицентральных районов сильных землетрясений, то есть разломная тектоника, дающая представление о пространственной в плане ориентации тектонических разломов, включая параметры геологической среды и действующие региональные поля тектонических напряжений. Затем приходится использовать априорные (предполагаемые) представления о параметрах тектонических разломов и величине тектонических напряжений, используемых при задании граничных условий [1–3]. При этом уровень соответствия результатов моделирования оценивается по результатам сейсмологических определений эпицентра, магнитуды землетрясения  $M$ , выделившейся сейсмической энергии  $E_s$ , протяженности образовавшегося разрыва  $L$ , сейсмического момента  $M_0$ , сброшенных напряжений, локализации афтершоков, включая механизм разрыва, определяемый по инверсии объемных волн и данных спутниковых геодезических наблюдений (ГНСС и спутниковая радарная интерферометрия), а также используется накопленный опыт в установленных эмпирических связях между этими параметрами [4–6].

Гипоцентры большинства сильных континентальных землетрясений находятся в интервале глубин от 5 до 15 км (при минимальной ошибке определения положения гипоцентра в пределах  $\pm 5$  км). Гипоцентры афтершоков этих землетрясений находятся в интервале глубин от 0 до 25 км, с максимумом плотности в интервале глубин также от 0 до 15 км. Это касается и землетрясений Акетао (25 ноября 2016 года,  $M_w$  6.6) и Тангшаньского землетрясения (27 июня 1976,  $M_s$  7.8). Для моделирования НДС эпицентральной зоны до и после землетрясения использована структурно-тектоническая схема разломной тектоники землетрясения и модель сейсмогенерирующего слоя мощностью 20 км. Метод конечных элементов использован для построения карт интенсивности напряжений и главных напряжений для анализа НДС до и после землетрясений. На этой основе выполнен ретроспективная оценка сейсмического момента  $M_0$  и механизма разрыва при его распространении. На основе анализа результатов моделирования напряженно-деформированного состояния, предшествующих землетрясениям Тангшань и Акетао, с косейсмическими геофизическими и геодезическими данными нами предлагается модель формиро-

вания разрыва землетрясения. Показано, что разрыв зарождается в условиях пересечения критической изобары интенсивности напряжений  $\sim 30\text{--}35$  МПа с областью отношения главных напряжений  $>3\div 4$ . Разрыв из «фокуса» землетрясения распространяется за счет сброса накопленной потенциальной энергии в зонах высокой интенсивности напряжений. Направление разрыва соответствует доминирующему направлению главных тектонических разломов, а его протяженность определяется двумя зонами высокой интенсивности напряжений. Связь площади разрыва с магнитудой находится в хорошем соответствии с зарегистрированными магнитудами землетрясений Тангшань и Акетао. Вычислена временная функция сейсмического момента  $M_o(t)$  при распространении разрыва и скалярный сейсмический момент  $M_o$ .

Полученные результаты дают основание для также направленных геолого-геофизических исследований в области предполагаемых гипоцентров с целью поиска предвестников землетрясения, ориентированных на оперативный прогноз катастрофического события.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России.*

- [1] Маневич А.И., Шевчук Р.В., Лосев И.В., Кафтан В.И., Урманов Д.И. Шакиров А.И. Определение и визуализация параметров движений и деформаций земной поверхности по данным ГНСС-наблюдений в среде Python 3 и QGIS 3 // Геодезия и картография, 2023, № 12, с. 17–26.
- [2] Морозов В.Н., Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Колесников И.Ю., Маневич А.И., Мельников А.Ю. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и результаты GPS-мониторинга эпицентральной зоны землетрясения 24 августа 2014 (г. Напа, шт. Калифорния, США) // Геотектоника, 2018а, № 5, с. 90–102.
- [3] Морозов В.Н., Маневич А.И., Татаринов В.Н. Ретроспективный прогноз места и интенсивности двух сильных коровых землетрясений в Иране и Индии // Вулканология и сейсмология, 2023, № 3, с. 69–78.
- [4] Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. – М.: Наука, 1976, с. 9–27.
- [5] Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, V. 84, No. 4, p. 975–1002.
- [6] Kanamori H., Brodsky E.E. The physics of earthquakes // Reports on Progress in Physics, 2004, Vol. 67(8), p. 1429–1496.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯ  
В ОБЛАСТИ ЧУЙСКОЙ И КУРАЙСКОЙ ВПАДИН  
(ГОРНЫЙ АЛТАЙ)**

**А.В. Маринин**

*Москва, Институт физики Земли им.О.Ю. Шмидта РАН,  
marinin@ifz.ru*

Полученные в последние десятилетия сведения о тектонических напряжениях на Горном Алтае с использованием геологических индикаторов напряжений/деформаций дают возможность получить сведения о палеотектонических напряжениях региона и сопоставить их с современным напряженным состоянием земной коры региона. Первые подобные реконструкции для Горного Алтая сделаны в работах Д. Дельво с соавторами в 90-х годах прошлого века [1]. В последнее время получены сведения о тектонических напряжениях на Горном Алтае с использованием разных методов и разных типов исходных данных [2–7 и др.], в том числе по данным реконструкции на основе изучения механизмом очагов землетрясений. Это дает возможность получить представления о действующих сейчас в земной коре тектонических напряжениях.

Материал наших исследований собран в районе Чуйской и Курайской впадин Горного Алтая в результате полевых тектонофизических работ в 2018 и 2022 годах. Одним из основных объектов полевого изучения являлись зеркала скольжения, встречаемые на поверхностях разрывных смещений и несущие достоверную информацию об их кинематике. При полевых исследованиях и последующем определении напряженно-деформированного состояния задействованы структурно-парагенетический метод анализа малых дизъюнктивов [8] и метод катакластического анализа разрывных смещений [9, 10]. По всем собранным данным с определением кинематики зеркал скольжения проведен расчет в программе STRESSgeol, использующей алгоритмы метода катакластического анализа разрывных смещений. В результате получены параметры напряженно-деформированного состояния в каждой точке наблюдения: положение осей главных напряжений, направление максимального горизонтального сжатия, тип напряженного состояния и коэффициент Лоде-Надаи.

При довольно большом многообразии ориентировок осей главных напряжений выделяется северо-западные направления максимального сжатия (рис. 1). Среди типов напряженного состояния (рис. 2) преобладают горизонтальный сдвиг (более 1/3 от общего количества) и горизонтальное растяжение (чуть менее 1/3 от общего количества). Кроме того, представительны обстановки горизонтального сжатия (20% определений) и горизонтального сжатия со сдвигом (15% определений). В целом на Горном Алтае среди типов напряженного состояния, определенного методом катакластического анализа разрывных нарушений (зеркал скольжения) обстановки горизонтального сдвига, преобладают еще более существенно [6, 7]. Таким образом,

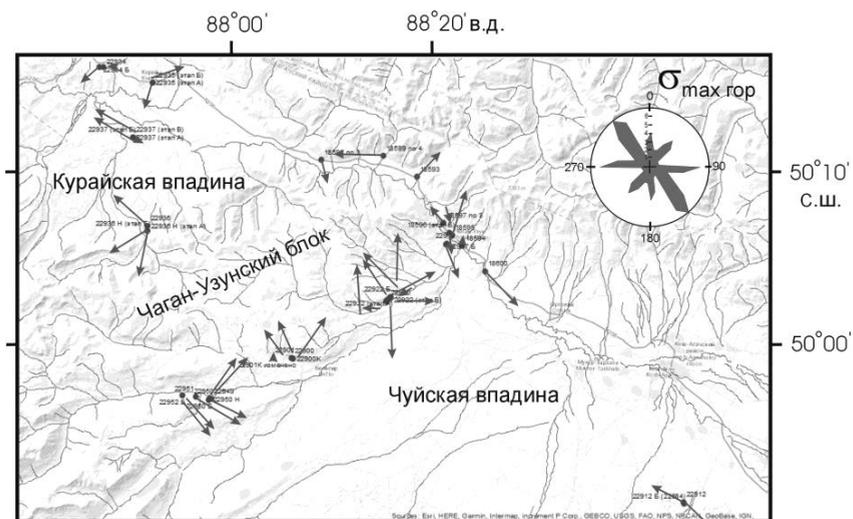


Рис. 1. Ориентировка проекций осей максимальных сжимающих напряжений района Чуйской и Курайской впадин. Направление стрелок в сторону погружения. Длина указывает на угол наклона оси – при крутом погружении стрелки короткие, при пологом погружении – длинные. В правом верхнем углу роза-диаграмма направлений максимального горизонтального сжатия (по данным расчетов в программе STRESSgeol).

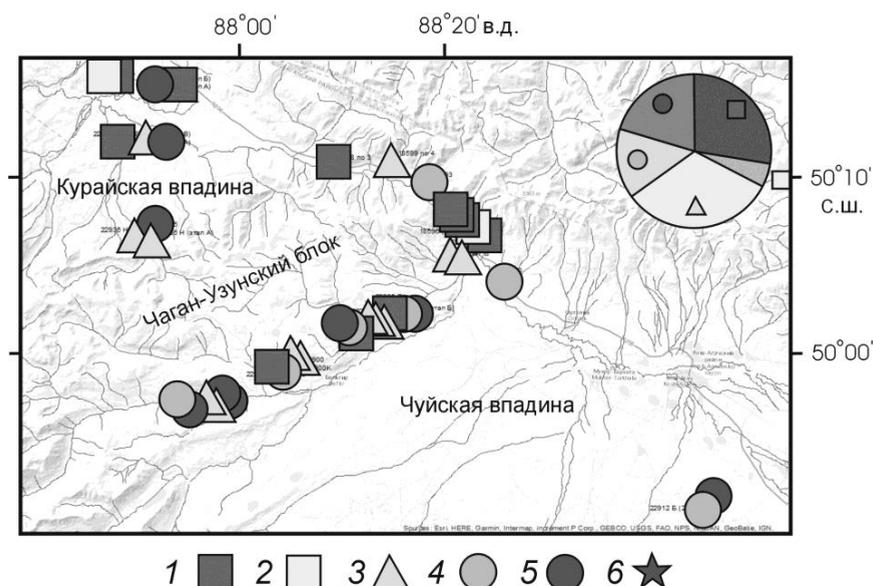


Рис. 2. Распределение полученных типов напряженного состояния в районе Чуйской и Курайской впадин Горного Алтая: 1 – горизонтальное растяжение; 2 – горизонтальное растяжение в сочетании со сдвигом; 3 – горизонтальный сдвиг; 4 – горизонтальное сжатие в сочетании со сдвигом; 5 – горизонтальное сжатие; 6 – сдвиг в вертикальной/горизонтальной плоскости (не представлен в районе). В правом верхнем углу диаграмма соотношения типов напряженного состояния в целом по району.

для района Чуйской и Курайской впадин отчетливой особенностью является наличие большого числа обстановок горизонтального растяжения, наличие которых также отмечалось ранее в работах [5, 6].

По данным ранее проведенных исследований современных тектонических напряжений, которые для реконструкции использовали сейсмологические данные, для данного района также было установлено северо-запад – юго-восточное направление максимального сжатия, отличного от преобладающего для всего Горного Алтая меридионального направления [2, 3]. По этим же данным в регионе преобладают обстановки горизонтального сдвига [4].

Проведенными ранее исследованиями с использованием структурно-геоморфологического метода анализа разрывных нарушений (Л.А. Сим) в районе Чуйской и Курайской впадин установлено, что на новейшем этапе разломы деформируются при активном север–северо-восточном горизонтальном сжатии, при этом подчиненное значение имеют север–северо-западное и субмеридиональное направления сжатия [6]. Данный метод опирается на анализ современных форм рельефа и отражает неотектонический этап развития района.

Установленные структурные рисунки и параметры напряженно-деформированного состояния в структурах Горного Алтая, выявленные структурно-парагенетическим и катакластическим методами анализа дизъюнктивных нарушений могут отражать сложную палеозойскую коллизионную и постпалеозойскую внутриплитную структуру региона, обусловленную наложением нескольких структурных планов в зонах влияния раннепалеозойской Западно-Саянской системы северо-восточного простирания и позднепалеозойской Рудно-Алтайской системы северо-западного простирания. Вместе с тем, наши результаты в части ориентации осей главных напряжений совпадают с современным полем напряжений локального уровня (для определенных временных интервалов), полученным на основе сейсмологических данных.

Автор выражает искреннюю благодарность свои коллегам, чьи материалы полевых наблюдений были использованы при реконструкции тектонических напряжений в этой части Горного Алтая: И.В. Бондарю, Н.А. Гордееву, П.А. Каменеву, А.Р. Лукманову и др., а также Ю.Л. Ребецкому, А.Ф. Еманову, А.А. Еманову и Е.В. Дееву за помощь в организации полевых исследований на Горном Алтае.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.*

- [1] Дельво Д., Тениссен К., Ван-дер-Мейер Р., Берзин Н.А. Динамика формирования и палеостресс при образовании Чуйско-Курайской депрессии Горного Алтая: тектонический и климатический контроль // Геология и геофизика, 1995, т. 36, № 10, с. 31–51.
- [2] Омар Х., Арефьев С.А., Ребецкий Ю.Л. Механизмы афтершоков 2004-2005 гг. и напряженное состояние очаговой области Алтайского землетрясения 2003 г. // Геофизические исследования, 2012, т. 13, № 3, с. 56–73.
- [3] Лескова Е.В., Еманов А.А. Иерархические свойства поля тектонических напряжений в очаговой области Чуйского землетрясения 2003 года // Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 1, с. 113–123.
- [4] Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саянской горной области // Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 2, с. 271–291.

- [5] Delvaux D., Cloetingh S., Beekman F., Sokoutis D., Burov E., Buslov M.M., Abdrahmatov K.E. Basin evolution in a folding lithosphere: Altai–Sayan and Tien Shan belts in Central Asia // *Tectonophysics*, 2013, V. 602, p. 194–222.
- [6] Маринин А.В., Сим Л.А., Мануилова Е.А., Бондарь И.В., Гордеев Н.А. Новейшее напряженное состояние Чуйско-Курайской впадины и прилегающих структур (юго-восточная часть Горного Алтая) // *Наука и технологические разработки*, 2022, т. 101, № 3, с. 33–52.
- [7] Тверитинова Т.Ю., Маринин А.В., Деев Е.В. Геодинамика Катунского разлома (Горный Алтай) по структурно-кинематическим данным // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*, 2023, № 1, с. 46–59.
- [8] Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // *Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов*. М.: ГИН АН СССР, 1987, Ч. 2, с. 173–235.
- [9] Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Изд. Наука, 2007, 406 с.
- [10] Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. ГЕОС Москва, 2017, 225 с.

## ПЛОТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ СРЕДНЕГО УРАЛА

**П.С. Мартышко, Д.Д. Бызов**

*Екатеринбург, Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,  
pmart3@mail.ru, ivanov389@gmail.com*

Для территории в координатах 56–60° с. ш. и 54–66° в. д. (листы геологической карты О-40, О-41) построена трехмерная плотностная модель земной коры Среднего Урала и прилегающих регионов. Информационную базу 3D-плотностной модели исследуемой территории составляют карты площадных аномалий гравитационного поля и данные глубинных сейсмических исследований по опорным профилям ГСЗ. Цифровая модель гравитационного поля в редукции Буге с шагом 500 м по X и Y координатам построена под руководством А.В. Чурсина «Уральской геологосъемочной экспедицией» на основе большого набора измерений разных лет с различной детальностью и масштабом. Это поле было выбрано нами для интерпретации.

Подробно авторская методика построения региональных 3D плотностных моделей изложена в статье [1]. Кратко опишем ее этапы. Заметим, что при построении трехмерной плотностной модели по гравитационному полю, заданному на поверхности Земли, в силу  $\varepsilon$ -эквивалентности существует достаточно широкий, но геологически адекватный, диапазон вариаций распределения плотности, оставаясь в котором модель будет удовлетворять наблюдаемому полю с заданной погрешностью. Чтобы этот диапазон уменьшить, для построения «плотностной модели нулевого приближения» необходимо использовать априорную информацию. В качестве таковой авторы использовали данные по 10 опорным сейсмическим геотраверсам глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), проходящих по территории Южного, Среднего и Северного Урала [1]. Была выполнена переобработка сейсмического материала методом двумерной сейсмической томографии и построены градиентные скоростные разрезы земной коры с однородной мантией в формате сеточных функций (2D модели распределения сейсмических скоростей до глубины 80 км). Затем к коэффициентам имеющейся обобщенной для Уральского региона эмпирической зависимости скорость-плотность были вычислены небольшие поправки, учет которых для профиля при пересчете скоростной модели в плотностную минимизирует невязку наблюдаемого гравитационного поля и поля модели. Далее, однородная мантия в 2D плотностной модели разбивалась вертикальными границами на блоки, латеральные координаты границ и плотности получившихся блоков подбирались с таким расчетом, чтобы выполнялось условие изостатической компенсации на глубине 80 км. В пространственных координатах («поверхность + глубина») сеточные скоростные разрезы представляют собой каркас трехмерной скоростной модели. По эмпирическим соотношениям «скорость-плотность» скоростные матрицы преобразованы в плотностные. Коэффициенты начальной регрессионной зависимости были уточнены в процессе решения линейной обратной задачи гравиметрии по всем сейсмо-плотностным разрезам. Недостающие про-

странственные данные заполняются послойно интерполированными значениями плотности с профильных разрезов. Модель интерполированной плотности сохраняет основные структурные элементы глубинного строения в окрестности сейсмических профилей и транслирует их подобие в межпрофильное пространство. Граничное условие изостатической компенсации на глубине дает возможность при моделировании наметить контуры мантийных блоков и найти в них распределение плотности компенсирующих масс.

Построенная таким способом 3D модель интерполированной плотности использовалась в качестве модели начального приближения при решении линейной обратной задачи. Модель начального приближения строилась так, чтобы наиболее полно учесть априорную информацию, при этом невязка наблюдаемого и модельного полей была достаточно большой.

Для сохранения содержательной морфологии модели в дальнейшем вычислялась слабо отклоняющаяся от нуля добавка к распределению плотности начальной модели, которая уменьшала относительную невязку полей до заданной величины в 0,5%. В модельных классах корректности плотностных параметров можно построить устойчивый алгоритм определения единственного решения линейной обратной задачи гравиметрии. Доказано, что латеральная плотность в горизонтальном плоском слое восстанавливается однозначно [2]. Поэтому разделение плотностного (сеточного) параллелепипеда начальной модели на семейство горизонтальных слоев позволяет реализовать алгоритм поиска слабо единственных решений обратной задачи гравиметрии для трехмерной мультипликативной избыточной плотности на множестве корректности двумерных добавок. В применяемой методике основу решения указанной задачи гравитационного моделирования составляет процесс разделения по глубине остаточных аномалий (разности наблюдаемого поля и поля модели начального приближения). Для реализации этого процесса авторы использовали оригинальный алгоритм, изложенный в [3]. Ранее он использовался авторами для выделения зон разуплотнения в слоях применительно к нефтегазовой тематике.

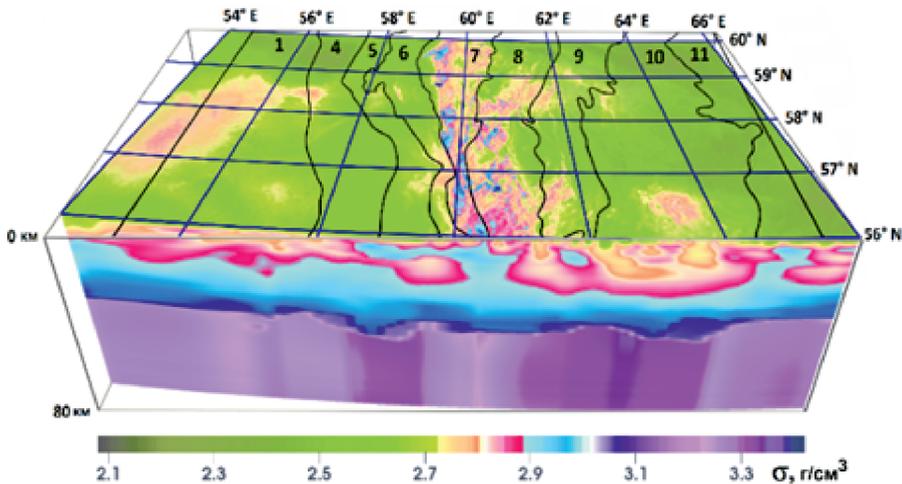


Рис. 1. Трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии.

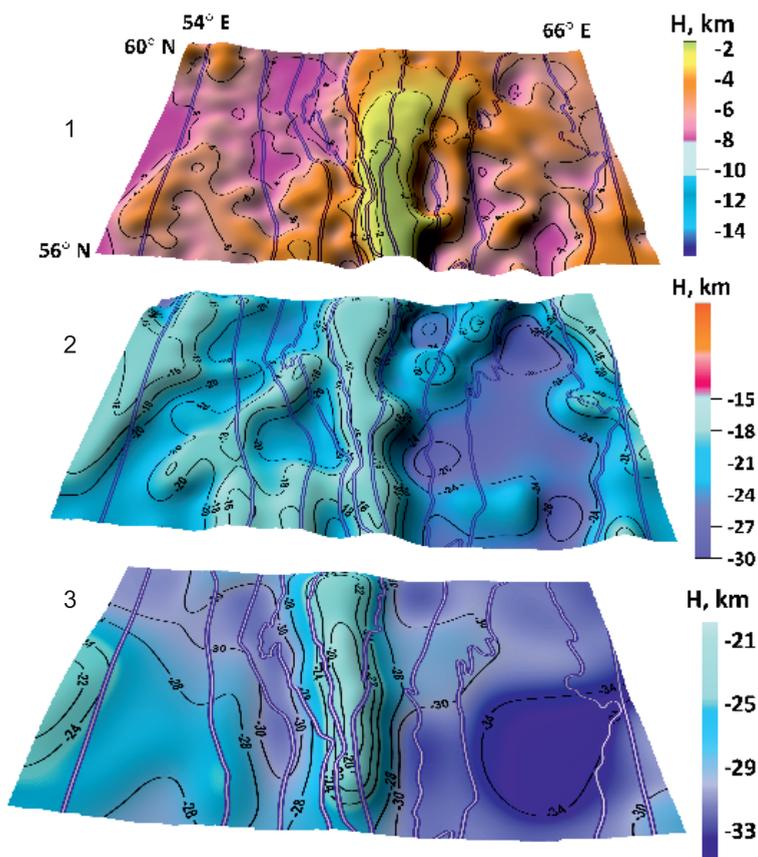


Рис. 2. Рельеф изоплотностных поверхностей раздела земной коры: 1 – верхняя кора ( $\sigma = 2,8 \text{ г/см}^3$ ,  $V_p > 6,0 \text{ км/с}$ ); 2 – средняя кора ( $\sigma = 2,88 \text{ г/см}^3$ ,  $V_p > 6,4 \text{ км/с}$ ); 3 – нижняя кора ( $\sigma = 2,95 \text{ г/см}^3$ ,  $V_p > 6,75 \text{ км/с}$ ).

Наконец, финальный этап методики гравитационного моделирования состоит в решении линейной обратной задачи гравиметрии независимо для каждой пары: горизонтальный слой модели в заданных шагом по сетке вычислений границах – разделенное разностное поле, соответствующее этому слою; при условии, что искомая добавка к распределению плотности начальной модели в слое не зависит от глубины.

В такой постановке задача является корректно поставленной [2]: ее решение единственно и устойчиво зависит от входных данных. Подробное описание итерационной схемы решения уравнения обратной задачи приведено в работе [4].

С использованием описанных выше методов была построена цифровая 3D плотностная модель исследуемой территории до глубины 80 км, в целом сохраняющая морфологию вдоль лежащих в ее основе двумерных сейсмо-плотностных разрезов и удовлетворяющая наблюдаемому полю с относительной невязкой 0,5% (рис. 1). Далее можно строить произвольные сечения этой модели [5].

*Работа выполнена при поддержке Российского научного Фонда (проект РНФ № 20-17-00058).*

- [1] Ладовский И.В., Мартышко П.С., Цидаев А.Г., Колмогорова В.В., Бызов Д.Д. Плотностная модель литосферы среднеуральского сегмента // Физика Земли, 2023, 2, с. 62–77.
- [2] Новоселицкий В.М. К теории определения изменения плотности в горизонтальном пласте по аномалиям силы тяжести // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1965, 5, с. 25–32.
- [3] Martyshko P., Ladovskii I., Byzov D. Parallel algorithms for solving inverse gravimetry problems: Application for Earth's crust density models creation // Mathematics, 2021, 9 (22), 2966.
- [4] Martyshko P.S., Ladovskii I.V., Byzov D.D., Tsidaev A.G. Gravity Data Inversion with Method of Local Corrections for Finite Elements Models // Geosciences, 2018, 8 (10), 373.
- [5] Бызов Д.Д., Мартышко П.С., Ладовский И.В., Цидаев А.Г. Трехмерные сейсмоплотностные модели земной коры и структурные схемы тектонического районирования Среднего Урала // Геология и геофизика. doi: 10.15372/GIG2024125.

**ОСТАНЦЫ ТЕТИСА  
ПОД ГРАНИЦЕЙ АРАВИЙСКО-АНАТОЛИЙСКОЙ ПЛИТ  
НА ОСНОВЕ МЕТОДА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ**

**И.В. Медведь<sup>1,2</sup>, Г. Полат<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Новосибирск, Новосибирский Государственный Университет,*

<sup>2</sup> *Новосибирск, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Zabelirina@yandex.ru,*

<sup>3</sup> *Стамбул, Турция, Университет Йедитепе*

В настоящей работе показаны новые результаты пассивной сейсмической томографии коры под границей Аравийской и Анатолийской плиты. Фокус внимания в работе был направлен на изучение глубинной структуры коры под северо-западной частью зоны Битлис-Загрос от Средиземного моря до восточной границы о.Ван. Актуальность исследования глубинного строения этого региона обосновывается его высокой сейсмической активностью. Несколько последних крупнейших исторических землетрясений произошли в изучаемом регионе в феврале 2023 года (Кахраманмарашское землетрясение с магнитудой Mw 7.8 и Элбистанское землетрясение с магнитудой Mw 7.5). Эти события и их афтешоки нанесли огромный ущерб местному населению и унесли жизни более 50000 человек. Сейсмическая активность региона обусловлена сложным тектоническим строением, которое объясняется взаимодействием нескольких тектонических плит, а именно: Аравийской, Африканской и Анатолийской, тройное сочленение которых расположено к югу от города Кахраманмараш, а также сложной историей эволюции.

Для получения моделей глубинной структуры под изучаемым регионом в настоящей работе задействован программный пакет пассивной сейсмической томографии LOTOS [1], который активно используется во всем мире. Применяемые для исследования данные состоят из каталогов Восточной Анатолии из работы [2], дополненные новыми каталогами для региона бассейна Адана. Все данные были предоставлены турецкими коллегами из Университета Йедитепе и организации AFAD (T.C. Ministry of Interior Disaster and Emergency Management Department Earthquake Department Directorate), г. Стамбул, Турция.

Результаты представляли из себя горизонтальные и вертикальные сечения  $V_p$  и  $V_s$  аномалий, которые подвергались тщательному тестированию отдельно друг от друга и показали высокую разрешающую способность. В работе представлены сейсотомографические модели до 60 км, которые демонстрируют результаты объединения данных.

Результаты показали хорошую согласованность с геологией региона. Консолидированные блоки Кыршехирского массива и Аравийской плиты характеризуются повышенными скоростями сейсмических волн, а крупные региональные разломные структуры, наоборот, выделяются в виде низкоскоростных аномалий. Кора под горами Тавра и Восточно-Анатолийским аккреционным комплексом характеризуется

структурой сэндвича: повышенными скоростями сейсмических волн в верхней коре и низкоскоростными аномалиями в нижней коре. Кроме того, результаты исследования показали уникальные глубинные структурные особенности. Так, кора под горным массивом Тавр имеет такую же сейсмическую структуру, как и кора под Восточно-Анатолийским аккреционным комплексом: повышенные скорости сейсмических волн в верхней коре и низкоскоростные аномалии в нижней коре. А под границей Аравийской и Анатолийской плит выделяются отдельные высокоскоростные структуры. Понижение скоростей сейсмических волн в нижней части коры в обоих регионах связано с разогревом со стороны горячего астеносферного потока. Были выделены три высокоскоростные структуры под Аравийско-Анатолийской границей, которые, по-видимому, являются останцами плиты Тетиса. Наблюдается изменение форм и размеров аномалий с востока на запад вследствие изменения тектонического режима в регионе. При этом останец под бассейном Адана утонняется вследствие преобладания сдвиговых процессов, а под зоной Битлиса на востоке исследуемого региона испытывает сжатие и, как следствие, распределяется субвертикально. Присутствие высокоскоростных структур между активными плитами может вызывать дополнительную сейсмическую активность в регионе.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Лаборатории обработки и анализа сейсмических данных НГУ №FSUS 2022-0019, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.*

- [1] Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion: Benchmarks for testing tomographic algorithms // Bull. Seismol. Soc. Am, 2009, 99 (1), p. 194–214.
- [2] Medved I., Polat G., Koulakov I. Crustal structure of the Eastern Anatolia Region (Turkey) based on seismic tomography // Geosciences, 2021, 11(2), 91p.

## РАЗНОМАСШТАБНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА, ЕГО ВОСТОЧНОЙ И ЮЖНОЙ ОКРАИН

Е.А. Мельник, В.Д. Суворов, Е.В. Павлов

Новосибирск, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
MelnikEA@ipgg.sbras.ru

Рассматриваются результаты обработки и интерпретации разномасштабных данных активной сейсмологии (МПВ, ГСЗ) в различных структурно-тектонических условиях Сибири. Применение комплексного анализа кинематических аномалий волнового поля, выраженных в системе годографов регистрирующихся волн, в связи с результатами численного моделирования структуры земной коры и верхов мантии вдоль профиля 3-ДВ [1] обеспечивает обнаружение ряда уникальных региональных неоднородностей, определяющих геодинамические различия в структурно-тектоническом районировании восточной и южной окраин Сибирского кратона, коррелирующихся с приповерхностной региональной геологией. Моделирование производилось итеративным методом прямого лучевого трассирования [10], гравитационное – по программе [2].

Земная кора Алдано-Станового щита в Становом блоке представлена двухслойной моделью и трехслойной в Алданском, разделенные ступенчатым увеличением мощности коры под южной частью сейсмоактивной Чульманской впадины [6]. В этой области можно выделить наклонную (под углом  $\sim 20^\circ$ ) зону разлома объединяющую ступень на Мохо с унаследованными погружениями кровли нижнего слоя коры и рельефа преломляющей границы, маркирующей положение подошвы дезинтегрированной толщи кристаллического фундамента. Здесь же, в средней коре формируется промежуточный слой (отсутствует в Становом блоке). При этом возникает проблема не единственности определения зоны сочленения блоков коры в центральной части профиля.

В верхней коре восточной окраины Сибирского кратона выделены Передовой Приверхоянский и Тыловой прогибы с прилегающей к последнему частью складчатой области, разделенные Сетте-Дабанской тектонической зоной [5]. Мощность осадочного чехла в прогибах достигает 22–28 км, что совпадает с оценками по геологическим данным [9]. Сетте-Дабанская зона шириной около 50 км в виде блока (вероятно, магматической природы) характеризуется аномально повышенной скоростью. Границу кратона можно определить в виде наклонной разломной зоны (с углом наклона  $\sim 15^\circ$ ), объединяющей поверхность фундамента с выклиниванием осадочных отложений Приверхоянского прогиба, согласно с изменениями мощности слоев в нижней части коры и ступенеобразным уменьшением глубины Мохо. Принципиальные различия в структуре верхней коры между Приверхоянским передовым прогибом и складчатой областью восточнее Сетте-Дабанской тектонической зоны отсутствуют.

Значения плотности получены по результатам гравитационного моделирования на основе сейсмических моделей коры восточной и южной окраин Сибирского кратона [8]. Для учета влияния латеральных изменений мощности слоев на плотность использована средневзвешенная величина  $R_0 = \sum h_i \rho_i / \sum h_i$ , где подстрочный знак  $i$  соответствует порядковому номеру слоя. Она характеризует значения плотности, взвешенной на толщину вышележащей коры, покрывающей подошву каждого из слоев. Характер распределения взвешенной плотности в земной коре восточной и южной окраин Сибирского кратона подчеркивает принципиальное различие их геодинамической природы. На Алдано-Становом щите отчетливые признаки наложенной складчатости отсутствуют. Только лишь в пределах Станового блока и Чульманской впадины в средней коре и всей ее толщине, за счет значительных вариаций мощности слоев наблюдаются согласно коррелируемые аномалии взвешенной плотности.

Особая эффективность комплексного анализа сейсмических данных показана при корреляции преломленно-рефрагированных и отраженных волн с последующим двумерным численным моделированием структур верхней коры Мало-Ботуобинского района Якутской кимберлитовой провинции [4] и Саяно-Байкальской складчатой области [7].

Приповерхностная структурно-тектоническая модель коры Саяно-Байкальской складчатой области (южный участок профиля 1-СБ) по данным МПВ (опорный профиль 1-СБ [1]), ранее применявшегося только в платформенных условиях, представлена блоковыми структурно-скоростными неоднородностями, выраженными в изменениях скорости 5.2–5.4 и 5.6–5.7 км/с, прослеженных на глубину 3–5 км и разделенных пологонаклонными (15–25) разломными зонами шириной до 7–10 км с различными направлениями падения осевых линий [7].

Численным моделированием волнового поля по оцифрованным данным площадных наблюдений ГСЗ уточнены ранее полученные структурно-скоростные характеристики земной коры в Мало-Ботуобинском кимберлитовом районе и сопредельных территориях, а именно рельеф внутрикоровой границы, залегающей на глубине 20–34 км в виде регионального поднятия северо-восточного простирания, соответствующего Виллойско-Мархинскому дайковому поясу, высокоамплитудные поднятия верхнекоревой границы I, залегающей на глубине 3–10 км, и локальные аномалии скорости до 6.5–6.6 км/с в верхах фундамента, к одной из которых приурочено эталонное Мирнинское кимберлитовое поле [4]. В районе другой подобной аномалии, расположенной в междуречье Вилюя и Мархи, в 2015 г. обнаружена Сюльдюкарская кимберлитовая трубка [3, 4].

*Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № FWZZ-2022-0021 «Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики».*

- [1] Кашубин С.Н., Мильштейн Е.Д., Винокуров И.Ю., Эринчек Ю.М., Сержантов Р.Б., Татаринев В.Ю. Государственная сеть опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин – основа глубинного 3D-картографирования территории Российской Федерации и ее континентального шельфа // Региональная геология и металлогения, 2016, № 67, с. 43–48.

- [2] Кочнев В.А., Гоз И.В., Поляков В.С. Технология расчета плотностной скоростной модели и статических поправок по гравиметрическим данным // Геофизика, 2008, № 4, с. 28–33.
- [3] Мальцев М.В., Толстов А.В., Фомин В.М., Старкова Т.С. Новое кимберлитовое поле в Якутии и типоморфные особенности его минералов-индикаторов // Вестник ВГУ. Сер. Геология, 2016, № 3, с. 89–94.
- [4] Суворов В.Д., Мельник Е.А. Региональная 3D структура фундамента Мало-Ботуобинского алмазоносного района по данным первых вступлений сейсмических волн // Технологии сейсморазведки, 2010, № 3, с. 85–95.
- [5] Суворов В.Д., Мельник Е.А. Сейсмическая модель зоны сочленения Сибирского кратона и Верхояно-Колымской складчатой системы (опорный профиль 3-ДВ) // Физика Земли, 2021, № 6, с. 52–67.
- [6] Суворов В.Д., Мельник Е.А., Павлов Е.В. Сейсмические неоднородности верхней и всей коры Алдано–Станового щита (профиль 3-ДВ) [Электронный ресурс] // Геодинамика и тектонофизика, 2023, Т. 14, № 1, с. 1–14.
- [7] Суворов В.Д., Мельник Е.А., Павлов Е.В., Сальников А.С. Региональное структурно-тектоническое районирование верхней коры Забайкалья по сейсмогравитационным данным вдоль опорного профиля 1-СБ [Электронный ресурс] // Геодинамика и тектонофизика, 2018, Т. 9, № 2, с. 439–459.
- [8] Суворов В.Д., Павлов Е.В., Мельник Е.А. Сейсмоплотностные признаки мезозойской складчатости в земной коре восточной пассивной окраины Сибирского кратона (профиль 3ДВ) // Геофизические технологии, 2022, № 1, с. 110–117.
- [9] Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Под редакцией Л.М. Парфенова и член-корреспондента РАН М.И. Кузьмина. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001, 571 с.
- [10] Zelt С. А., Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic traveltime data // Geophysical Journal International, 1999, № 139, p. 183–204.

## ВАЛИДАЦИЯ ПОРОУПРУГОЙ МОДЕЛИ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Л.А. Назаров<sup>1</sup>, Л.А. Назарова<sup>2</sup>, Н.А. Голиков<sup>1</sup>, А.А. Скулкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирск, Новосибирский государственный университет,

<sup>2</sup> Новосибирск, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН

### Введение

Проектирование и реализация систем разработки месторождений углеводородов, обоснование схем заблаговременной дегазации угольных залежей, оценка добычных возможностей скважин, интерпретация данных ГИС – вот далеко не полный перечень проблем, решение которых невозможно без достоверной информации о коллекторских свойствах пород [1, 2]. Трещиновато-пористая структура характерна для многих угольных и нефтяных пластов, процессы массопереноса в которых описываются с использованием моделей с двойной проницаемостью и двойной пористостью (DPDP) [3], когда в элементарном объеме одновременно существуют два поля давления: в трещинном пространстве  $p_1$  и матрице  $p_2$ . Такие модели содержат ряд феноменологических параметров [4], которые, как правило, оцениваются по косвенным данным или на основе регулярных упаковок частиц, имитирующих пористую среду [5].

В настоящей работе в рамках DPDP модели [3] описывается метод определения трещинной проницаемости  $k_1$  и коэффициента массообмена  $\psi$  между трещинами и матрицей по данным экспериментов с образцами из искусственного геоматериала.

### Программа испытаний

Каждый образец собирался из семи пластин (длина  $l = 100$  мм, ширина  $w = 70$  мм, толщина  $h = 10$  мм, рис. 1а), которые изготавливались из смеси песка и криогеля по описанной в [6] технологии. Определенная стандартным методом проницаемость  $k_2$  такого искусственного геоматериала оказалась равной 8.4 Д.

Для интерпретации данных фильтрационных испытаний необходимо установить зависимость раскрытия  $v$  межблочных нарушений  $J$  (рис. 1а) от нормальных напряжений  $\sigma$  (рис. 1б). В [7] деформирование  $J$  предложено описывать соотношением

$$\sigma(u) = Ku / (1 - u / u_0),$$

где  $K$  – нормальная жесткость,  $u$  и  $u_0$  – конвергенция и предельное сближение берегов  $J$ , тогда  $v = u_0 / u$ . Эксперименты [8] позволили найти значения  $K = 1570$  МПа/м и  $u_0 = 0.07$  мм.

Образец 1 по боковой поверхности изолировался полиуретановой манжетой 2 (рис. 1б, в) и помещался в испытательную камеру 3 (рис. 1в). С помощью гидравлического пресса 4 (рис. 1г) ортогонально плоскостям нарушений  $J$  прикладывалась

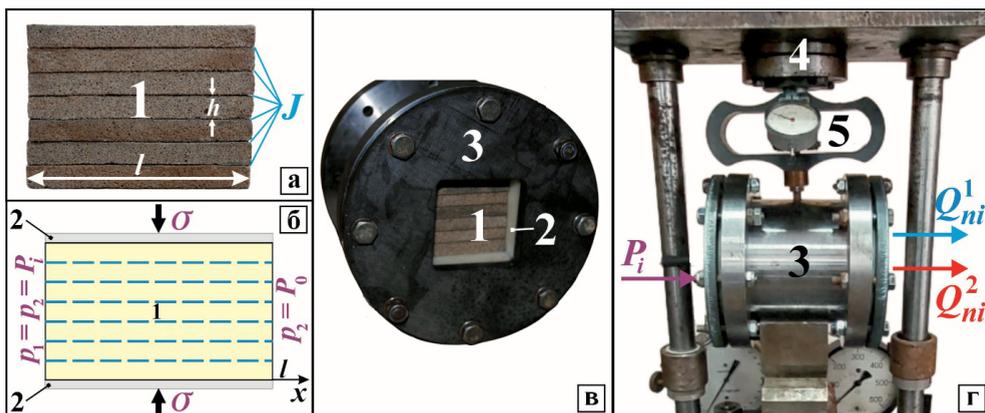


Рис. 1. Образец (а); расчетная область (б); испытательная камера (в); фрагмент экспериментальной установки (г).

Таблица 1

Расходы  $Q_{ni}^1$ ,  $Q_{ni}^2$  (л/мин) и результаты интерпретации

$i$	$P_i$ , атм	$Q_{ni}^1$	$Q_{ni}^2$	$k_1$ , Д	$10^{12}\psi$
2	1.03	7.25	6.98	4.32	7.96
4	1.05	12.05	11.60	5.46	8.60
6	1.07	16.90	16.30	5.95	7.87
8	1.09	21.75	20.95	10.00	8.14
среднее				5.25	8.10

ступенчатая нагрузка  $\sigma = \sigma_n$ , которая регистрировалась динамометром 5. При значениях  $\sigma_n = 22, 33, 54, 81, 111, 135, 173, 232, 359$  кПа проводились фильтрационные эксперименты: на левом конце образца  $x = 0$  (рис. 1а,б,г) создавалось давление газа  $P_i = 1.02, 1.03, \dots, 1.10$  атм, на правом конце  $x = l$  в стационарном режиме измерялся расход  $Q_{ni}^1$  (вариант 1). Вариант 2: нарушения  $J$  на правом конце тампонируются пенетрантом, проводились аналогичные фильтрационные испытания – фиксировались расходы  $Q_{ni}^2$ . Выборочные данные экспериментов для  $\sigma_n = 232$  кПа (при этом  $\nu = 0.023$  мкм) показаны в табл. 1.

### Интерпретация данных экспериментов

Уравнения стационарной фильтрации в образце имеют вид [8]

$$k_m p_{m,xx} + (-1)^m \psi(p_1 - p_2) = 0, \quad (1)$$

граничные условия:

$$p_m(0) = P_i, \quad p_m(l) = P_a \text{ (вариант 1);} \quad (2)$$

$$p_m(0) = P_i, \quad p_{1,x}(l) = 0, \quad p_2(l) = P_a \text{ (вариант 2),} \quad (3)$$

Проницаемость  $k_1$  при различных  $\sigma_n$  и результаты расчетов по (4)

$n$	$\sigma_n$ , МПа	$k_1$ , Д	$k_1(\sigma)$ , Д
2	0.033	57.05	61.43
4	0.081	25.68	24.71
6	0.135	13.29	12.31
8	0.232	5.25	5.26

где  $m = 1$  соответствует трещинному пространству,  $m = 2$  – матрице,  $P_a$  – атмосферное давление, ось  $x$  направлена вдоль образца (рис. 1б). Для краевых задач (1), (2) и (1), (3) найдены аналитические решения [8], например:

$$p_m(x) = P_i - (P_i - P_a)x/l \quad (\text{вариант 1}),$$

$$Q_{ni}^1 = w[(N-1)vk_1 + Nhk_2](P_i - P_a)/(\eta l)$$

( $v = Ku_0/(K + \sigma_n/u_0)$ ,  $N = 7$  – число пластин,  $\eta$  – вязкость воздуха), по которым на каждом шаге нагружения  $n$  определялись  $k_1$  и  $\psi$  как средние значения по всем  $i$  (табл. 1).

В табл. 2 (третья колонка) приведен фрагмент экспериментальных данных, характеризующих связь трещинной проницаемости  $k_1$  и напряжений  $\sigma_n$ . Для аналитического описания зависимости  $k_1(\sigma)$  выбрана функция

$$k_1(\sigma) = k_* / (A\sigma + B)^2, \quad (4)$$

где  $A$  и  $B$  – эмпирические константы,  $k_* = 10$  Д.

Методом наименьших квадратов найдены значения  $A = 15.6$  Мпа<sup>-1</sup> и  $B = 0.76$ . В последней колонке табл. 2 приведены результаты расчетов  $k_1(\sigma)$  по формуле (4), свидетельствующие, что относительная ошибка аппроксимации не превышает 10%.

### Заключение

Разработанный экспериментальный метод предназначен для параметрического обеспечения couple моделей, используемых для исследования процессов массообмена в трещиновато-пористых пластах-коллекторах. Идея метода – проведение испытаний на одном и том же образце с изменяющимися условиями на торцах, что позволило в рамках DPDP модели оценить фильтрационные свойства геоматериала: трещинную проницаемость и коэффициент массообмена.

Дальнейшие исследования будут направлены на развитие предложенного подхода для определения емкостных характеристик трещиновато-пористых геоматериалов и горных пород по данным нестационарных испытаний образцов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-27-00339).*

- [1] Fjaer E., Holt R.M., Horsrud, P. et al. Petroleum Related Rock Mechanics. Amsterdam, Elsevier, 2008, 492 p.
- [2] Seidle J. Foundations of coalbed methane reservoir engineering. Tulsa, PennWell Books, 2011, 416 p.
- [3] Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П. Кочина И.Н. Об основных представлениях теории фильтрации в трещиноватых средах // ПММ, 1960, т. 24, № 5, с. 58–73.
- [4] Ma J. Review of permeability evolution model for fractured porous media // J. Rock Mech. Geotech. Eng., 2015, v. 7(3), p. 351–357.
- [5] Van Golf-Racht T. Fundamentals of fractured reservoir engineering. Amsterdam, Elsevier, 1982, 732 p.
- [6] Nazarova L.A., Nazarov L.A., Skulkin A.A., Golikov N.A. Stress-permeability dependence in geomaterials from laboratory testing of cylindrical specimens with central hole // J. Min. Sci., 2019, v. 55(5), p. 708–714.
- [7] Barton N.R. Deformation phenomena in jointed rock // Geotechnique, 1986, v. 36(2), p. 147–167.
- [8] Назаров Л.А., Голиков Н.А., Скулкин А.А., Назарова Л.А. Экспериментальное определение фильтрационных свойств трещиновато-пористых геоматериалов в рамках модели среды с двойной проницаемостью // ФТПРПИ, 2023, № 4, с. 11–23.

## ОЦЕНКА СЕЙСМОГЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАЗЛОМА

А.А. Остапчук

Москва, Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН,  
ostapchuk.aa@idg.ras.ru

Неоднородная структура ядра тектонического разлома определяет пространственную вариацию режимов его деформирования от асейсмического крипа и событий медленного скольжения до динамических срывов, являющихся очагами землетрясений различной магнитуды. Разные формы реализации энергии деформирования характерны как для крупнейших событий в зонах субдукции, так и для явлений, индуцированных техногенной деятельностью. В настоящей работе представлена методика комплексного анализа геолого-геофизической информации, направленная на оценку сейсмогенного потенциала локальных сегментов тектонического разлома и выявление зон потенциального зарождения крупных сейсмогенных подвижек.

В рамках исследования 160-километрового участка Приморского разлома Байкальской рифтовой зоны было показано, что ширина зоны наиболее интенсивных деформаций, ядра разлома, варьируется от 100 до 500 м, при этом оценка ширины по данным электротомографических измерений сопоставима с результатами петрографического изучения образцов горных пород, отобранных на эксгумированных участках. Анализ вещественного состава и фрикционного поведения отобранных образцов горных пород показывает, что сегменты разлома с наиболее узким ядром сложены породами со свойством скоростного разупрочнения и являются зонами формирования очагов сильных землетрясений. Характерный размер таких сегментов составляет порядка 10 км, а расстояние между ними около 60 км.

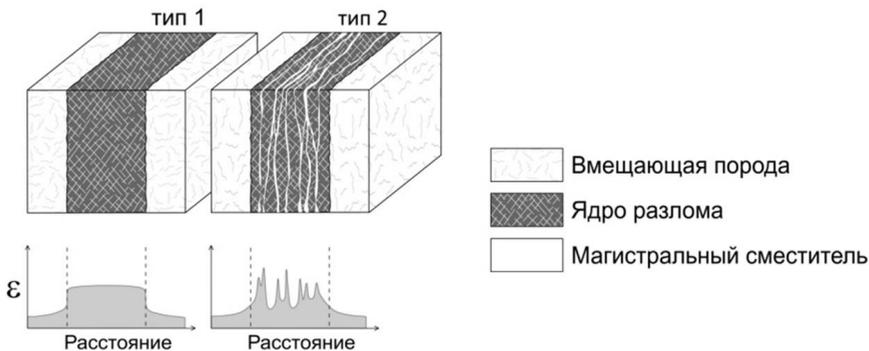


Рис. 1. Схематическое строение ядра разлома с равномерным распределением деформаций  $\epsilon$  вкrest простирания (тип 1) и с пространственно неоднородным накоплением деформаций вкrest простирания с формированием множественных магистральных сместителей (тип 2). На участках с ядром типа 1 реализуется асейсмический крип, тип 2 – медленные подвижки.

В рамках исследования параметров шахтной сейсмичности на Коробковском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии выполнено увязывание характеристик сейсмических событий, локализованных в зоне тектонического разлома, со структурой разлома (рис. 1). Особенностью индуцированных сейсмических событий является их низкая излучательная эффективность  $8.9 \cdot 10^{-9} - 4.9 \cdot 10^{-7}$ , соответствующая классу «медленных» землетрясений. В то же время ядро разлома в зоне локализации сейсмических событий имеет пространственную неоднородную структуру и сложено преимущественно породами со свойством скоростного упрочнения, для которых характерны деформации в виде крипа и медленных подвижек.

*Работа выполнена в рамках выполнения проекта РНФ № 20-77-10087.*

**ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ  
ПОРОВО-ТРЕЩИННОГО ПРОСТРАНСТВА КРАСНОГО СИЛЬВИНИТА  
ПРИ СТУПЕНЧАТОМ ОДНООСНОМ СЖАТИИ  
ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ**

**И.А. Пантелеев<sup>1</sup>, А.А. Барях<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Пермь, Институт механики сплошных сред УрО РАН,

<sup>2</sup>Пермь, Горный институт УрО РАН,

*pia@icmm.ru*

В результате многолетних экспериментальных исследований деформационного поведения соляных пород Верхнекамского месторождения при различных видах нагружения показано, что коэффициент вариации механических и прочностных свойств может превышать 30% даже для образцов, изготовленных из одного монолита [1]. Причины такого разброса значений многообразны: вариации объемного содержания различных минералов, вариация среднего размера зерен, наличие разномасштабных дефектов различной природы, содержание глинистого материала, влажность и т.д.

Петрологическое описание конкретных образцов, характеристика их внутренней структуры, как правило, базируются на описании шлифов и результатах сканирующей (растровой) электронной микроскопии (РЭМ). Шлифы подходят для оценки истории образования и формирования породы, однако возможности детального описания строения с помощью этого метода весьма ограничены ввиду низкого разрешения (не выше толщины шлифа, около 5–40 мкм), присутствия минеральных зерен различной оптической плотности, которые не всегда позволяют с достаточной точностью провести интерпретацию изображения. С другой стороны, при исследовании шлифов есть возможность получения изображений в скрещенных и параллельных николях, что позволяет определять ориентацию кристаллов. РЭМ дает изображения высочайшего разрешения до единиц нм, но они являются двухмерными проекциями трехмерных поверхностей сколов. Основным недостатком вышеперечисленных методов является их двухмерность и возможное нарушение структуры. При этом для понимания и моделирования различных физико-механических процессов, происходящих в породах, необходимо иметь детальное представление о ее трехмерном строении, распределении по объему различных минеральных фаз, дефектов различного типа, включая поры и микротрещины.

Альтернативным неразрушающим методом, позволяющим получать трехмерные изображения внутреннего строения материала, является метод рентгеновской микротомографии. При разработке нефтегазовых или рудных месторождений томографическое исследование кернов фактически стало стандартом при оценке содержания полезных ископаемых и пористости горных пород. Данный метод в сочетании с другими методами неразрушающего контроля показал свою эффективность

при изучении механизмов деформирования и разрушения ряда кристаллических и осадочных горных пород [2–4].

Данная работа посвящена сравнительному анализу данных деградации механических и прочностных свойств красного сильвинита в процессе его ступенчатого одноосного сжатия и данных эволюции его внутренней дефектной структуры, полученных методом рентгеновской микротомографии.

Для реализации экспериментальной программы были подготовлены призматические образцы красного сильвинита с характерным размером 20x18x21 мм. Каждый из образцов подвергался последовательным циклам «нагрузка-разгрузка» с шагом по максимальному приложенному напряжению 2 МПа вплоть до разрушения. Томографическая съемка образцов в исходном состоянии и после каждого цикла осуществлялась на микротомографе SkyScan 1272 Bruker со следующими параметрами: напряжение на рентгеновской трубке 100 кВ, ток 100 мкА, разрешение (размер ребра вокселя) 12 мкм, время экспозиции 3000 мкс, шаг вращения образца 0.3° со съемкой на 360°. Продолжительность съемки каждого образца составила 8 часов 12 минут. Для минимизации влияния граничных эффектов осуществлялась съемка объема материала в средней (по высоте) части образца. При заданном пространственном разрешении высота отснятой области образца составила 8.52 мм. Полученный стек из 750 теневых проекций был реконструирован в набор двумерных поперечных сечений с применением методики компенсации ошибки в определении положения образца, как правило, вызванной дрейфом эмиттера источника рентгеновского излучения, тепловым расширением объекта съемки внутри или случайными механическими вибрациями.

Для количественного морфологического анализа нарушений сплошности сильвинита в процессе деформирования была реализована процедура выделения отдельных дефектов на 3D-изображении с последующей оценкой следующих параметров: объем, максимальный линейный размер, коэффициент сферичности [5]. В результате кластерного анализа многомерных данных параметров дефектов сплошности, определенных по томографическим данным, установлено, что все выявленные дефекты можно разделить на два кластера, соответствующих пороподобным дефектам (малый объем, высокий коэффициент сферичности) и трещинно-подобным дефектам (большой объем, низкий коэффициент сферичности). Показано, что с ростом максимального приложенного напряжения наблюдается рост общего объема дефектов сплошности, с одной стороны, и рост объема и количества трещинно-подобных дефектов, относительно пороподобных дефектов, с другой стороны.

Сравнительный анализ изменения механических свойств испытанных образцов (модуля упругости, максимальной деформации, остаточной деформации) и объема выявленных дефектов обоих типов позволил установить прямую корреляционную зависимость между этими характеристиками. Полученные результаты и найденные зависимости могут быть использованы для построения феноменологических моделей деформирования горных пород, учитывающих эволюцию их дефектной структуры путем явного или неявного введения внутренних переменных различного типа.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-77-30008.*

- [1] Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие. Пермь, ПГТУ, 2008.
- [2] Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Гафурова Д.Р., Фролов Д.И. Структура деформируемого гетерогенного материала по данным акустической эмиссии и рентгеновской микротомографии // Физика твердого тела, 2018, т. 60(7), с. 1353–1357.
- [3] Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Корост Д.В., Дамаскинский К.А. Структурно-энергетические закономерности накопления повреждений при деформировании гетерогенного материала // Физика твердого тела, 2021, т. 63(1), с. 103–109.
- [4] Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Кадомцев А.Г., Наймарк О.Б. Влияние состояния внутренних границ раздела на характер разрушения гранита при квазистатическом сжатию // Физика твердого тела, 2017, т. 59(5), с. 920–930.
- [5] Пантелеев И.А., Соколов А.С., Барях А.А. Характеризация внутренней структуры сильвинита по данным рентгеновской микротомографии // Горное эхо, 2022, т. 4(89), с. 49–54.

## ОРИЕНТАЦИОННАЯ ПРИРОДА ПОРОУПРУГОЙ РЕАКЦИИ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОГО КОЛЛЕКТОРА НА ПРОХОЖДЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН: ТЕОРИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ

И.А. Пантелеев<sup>1</sup>, V. Lyakhovsky<sup>2</sup>, E. Shalev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Пермь, Институт механики сплошных сред УрО РАН,

<sup>2</sup> Jerusalem, Geological Survey of Israel,

*pia@icmm.ru*

Изучение многочисленных проявлений гидрогеосейсмических вариаций в изменениях давления, разгрузки, температуры и химического состава подземных вод и газов при вибрационном воздействии сейсмических волн на подземные водоносные системы является одним из магистральных направлений изучения последствий сильных и средних землетрясений в сейсмоактивных регионах мира [1–3]. Недавние скважинные наблюдения колебаний порового давления в районе крупной разломной зоны [4], вызванных прохождением сейсмических волн, позволили выявить азимутальную зависимость амплитуды колебаний давления, связанную с взаимной ориентацией разломной зоны, осей главных горизонтальных напряжений и направления прихода волны. Возможной причиной обнаруженной зависимости является наличие преимущественной ориентации гидравлически проводящих трещин в районе разломной зоны, связанной с ее поэтапным формированием. Наличие преимущественной ориентации трещиноватости является причиной анизотропии пороупругих свойств среды, что, в свою очередь, приводит к зависимости деформационного отклика флюидонасыщенного коллектора от направления прихода сейсмических волн.

В рамках данной работы авторами впервые предложена теоретическая модель эффекта азимутальной зависимости отклика порового давления в приразломной зоне на прохождение сейсмических волн. В основе разработанной теоретической модели лежит явление анизотропии пороупругих свойств, индцированной микротрещиноватостью породы, преимущественная ориентация которой, в свою очередь, определяется кинематикой активной разломной зоны [5, 6]. Предложено обобщение уравнения Скемптона для недренированного состояния трещиноватой породы, определяющего связь порового давления флюида с величиной ее объемной и сдвиговой деформации, на случай зависимости коэффициентов уравнения от компонент тензора поврежденности второго ранга. Введение тензора поврежденности, с одной стороны, позволяет описать преимущественную ориентацию трещиноватости породы, и индуцированную ей анизотропию механических свойств. С другой стороны, позволяет напрямую связать величину изменения порового давления, вызванного прохождением сейсмических волн, с их азимутом.

В результате проведенных численных экспериментов показано, что все возможные сценарии отклика порового давления флюида в районе активной разломной зоны на прохождение сейсмических волн, определяются взаимной ориентацией

сдвиговой разломной зоны, микротрещиноватости в ее окрестности и осей максимального и минимального горизонтальных напряжений, действующих во флюидонасыщенном коллекторе.

Для верификации предложенной теоретической модели использованы комплексные данные скважинного мониторинга резервуара сброса сточных вод Арбакл (Оклахома, США) (Arbuckle wastewater disposal reservoir, Oklahoma, USA) [4], реализуемого Американской геофизической службой. Показано, что наблюдаемое разнообразие отклика порового давления в скважинах, расположенных в окрестностях разломной зоны, пересекающей резервуар, на прохождение сейсмических волн от разноудаленных сейсмических событий с высокой точностью описывается разработанной моделью.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-77-30008.*

- [1] Горбунова Э.М., Виноградов Е.А., Беседина А.Н., Гашев Д.В. Реакция подземных вод на землетрясения и крупномасштабные взрывы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2017, № 1, с. 273–290.
- [2] Wang Ch.-Y., Manga M., Water and Earthquakes. Switzerland: Springer, 2021, 387 p.
- [3] Boldina S.V., Kopylova G.N., Kobzev V.A. Study of Seismic Effects on Changes in Groundwater Pressure: Equipment and Some Well Observastion Results for the Kamchatka Peninsula // Geodynamics & Tectonophysics, 2022, Vol. 13 (2), p. 0594.
- [4] Barbour A.J., Beeler N.M. Teleseismic waves reveal anisotropic poroelastic response of waste water disposal reservoir // Earth Planet. Phys, 2021, Vol. 5. epp2021034.
- [5] Lyakhovsky V., Panteleev I., Shalev E., Browning J., Mitchell T.M., Healy D., Meredith P.G. A new anisotropic poroelasticity model to describe damage accumulation during cyclic triaxial loading rock // Geophysical Journal International, 2022, Vol. 230, p. 179–201.
- [6] Пантелеев И.А., Ляховский В., Мубассарова В.А., Карев В.И., Шевцов Н.И., Шалев Э. Тензорная компакция пористых пород: теория и экспериментальная верификация // Записки Горного института, 2022, т. 254, с. 234–243.

**ЭВОЛЮЦИЯ СИГНАЛОВ ВАРИАЦИЙ АЭРОЗОЛЕЙ, ТЕМПЕРАТУРЫ  
СКАЛЬНЫХ ПОРОД И ДЕФОРМАЦИИ КОРЫ В ДАЛЬНЕЙ ШТОЛЬНЕ  
БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ТУРЦИИ 06.02.2023 Г.**

**С.М. Першин<sup>1</sup>, А.Л. Собисевич<sup>2</sup>, В.В. Гравиров<sup>2</sup>, М.Я. Гришин<sup>1</sup>,  
Д.В. Лиходеев<sup>2</sup>, А.В. Мясников<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Москва, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,

<sup>2</sup> Москва, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, gravirov@mail.ru,

<sup>3</sup> Москва, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ

Начиная с 2004 года в Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) [1] на удалении от устья штольни порядка 4 км была оборудована уникальная подземная геофизическая лаборатория [2]. В лаборатории был установлен комплекс научного оборудования, который позволяет проводить непрерывные исследования флюидной активности [3], деформационных процессов, слабой сейсмичности, а также изучать температурные аномалии в пределах Эльбрусского вулканического центра [4]. Актуальность подобных исследований связана с тем, что несмотря на значительные успехи фундаментальных исследований в области наук о Земле, многие вопросы в рамках комплексной проблемы изучения физических механизмов возникновения и развития опасных природных геодинамических процессов до сих пор не получили исчерпывающего объяснения. Для решения этой междисциплинарной проблемы современной геофизики первостепенное значение по-прежнему имеет комплексный сбор натуральных данных. В подземной геофизической лаборатории успешно функционируют не имеющие мировых аналогов геофизические информационно-измерительные системы, обеспечивающие регистрацию деформационных, сейсмических, температурных и магнитных вариаций в условиях минимального уровня естественных помех.

В 2023 году во время первого и второго сильных землетрясений в Турции 06.02.2023, имевших почти одинаковые магнитуды 7.8 и 7.7 [5], нами была обнаружена корреляция сигналов лазерного деформографа, лазерного лидара (измеряющего плотность вариаций аэрозолей) и значений температуры внутри скального основания [6]. Поскольку расстояние от эпицентров землетрясений до тоннелей БНО составляло около 900 км, то появлялась вероятность проявлений вариации напряжённо-деформированного состояния в сигналах деформографа, термометра и лидара, что и было обнаружено при первичном анализе собранных данных.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ №19-19-00712, а также в рамках государственного задания ГАИШ, ИОФ и ИФЗ РАН.*

[1] Кузьминов В.В. Баксанская нейтринная обсерватория // Земля и вселенная, 2011, № 1, с. 47–61.

- [2] Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Т. 2. Северокавказская геофизическая обсерватория. Создание, анализ результатов наблюдений. Москва, ИФЗ РАН, 2013, 512 с.
- [3] Pershin S.M., Sobisevich A.L., Grishin M.Ya., Gravirov V.V., Zavozin V.A., Kuzminov V.V., Likhodeev D.V., Lednev V.N., Makarov V.S., Myasnikov A.V., and Fedorov A.N. Volcanic activity monitoring by unique LIDAR based on a diode laser // *Laser Phys. Lett.*, 2020, v. 17(11), p. 115607–115613.
- [4] Лиходеев Д.В., Гравиров В.В., Кислов К.В., Долов С.М. Прецизионные узкодиапазонные дифференциальные температурные датчики // *Научное приборостроение*, 2019, т. 29, № 1. с. 11–16.
- [5] Свалова В.Б. Землетрясения в Турции и Сирии 2023 года и геодинамика Кавказско-Анатолийского региона // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*, 2023, т. 3, с. 28–41.
- [6] Лиходеев Д.В., Собисевич А.Л., Гравиров В.В. Приливные эффекты в тонкой структуре тепловых полей по результатам наблюдений в глубокой штольне Северокавказской геофизической обсерватории // *Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле*, 2022, т. 503, № 2, с. 148–153.

## ТЕКТОНОФИЗИКА О ФОРМИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЛИТОСФЕРЕ ОРОГЕНОВ ЗОН СУБДУКЦИИ ТИХООКЕАНСКОГО ТИПА

Ю.Л. Ребецкий, Т.Ю. Тверитинова

Москва, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
reb@ifz.ru

Формирование всех основных структур и процессов в зонах субдукции рассматривается в рамках концепции тектоники литосферных плит, основополагающей теорией которой являются циклы Вилсона. Последние предполагают, что основным фактором, создающим условие для горизонтального движения океанской литосферной плиты, является восходящая ветвь общемантийной конвекции (рис. 1), формирующая зону океанского спрединга (ЗОС). Здесь в соскальзывающей с хребта океанской литосферной плите возникает повышенное горизонтальное давление.

Считается, что горизонтальные ветви мантийной конвекции, растекающиеся в обе стороны от ЗОС, создают касательные напряжения на подошве океанской литосферы в стороны от ЗОС к зонам субдукции. Это увеличивает уровень горизонтальных напряжений сжатия по мере приближения к зоне субдукции (ЗС). Третьим силовым фактором, определяющим движение океанской литосферной плиты в ЗС, является тяговое усилие со стороны погруженной в мантию части океанской литосферы. Оно возникает по мере погружения океанской литосферы вследствие ее утяжеления из-за избавления от части воды. Все перечисленные силовые факторы не только определяют горизонтальное движение океанической литосферы вдоль земной сферы, но и предопределяют ее пододвигание под континентальную. Продолжение этих взглядов должно распространяться также на геометрию слэба в верхней мантии – обратный изгиб и выполаживание на глубинах 400–600 км. Следствием действия всех указанных выше силовых факторов в океанской литосфере в зоне перед тальвегом желоба, там, где литосфера еще не испытывает значимого изгиба, в направлении, нормальном к простиранию ЗС, должен действовать наибольший уровень напряжений горизонтального сжатия, и это напряжение является главным сжатием. По мере погружения слэба океанской литосферы это сжатие должно уменьшаться из-за действия тягового усилия при погружении слэба. На-

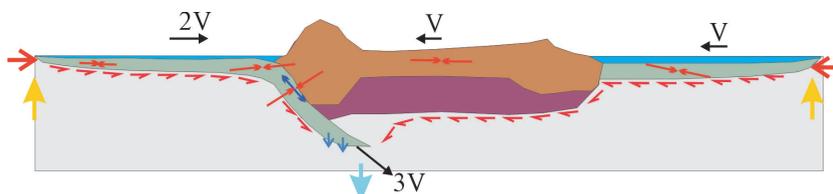


Рис. 1. Активные силы и напряжения в рамках существующей концепции тектоники литосферных плит.

личие более высокого уровня напряжений горизонтального сжатия вблизи тальвега желоба со стороны океанской литосферы должно приводить к тому, что и с другой стороны от тальвега океанского желоба, т.е. в континентальном склоне, в направлении, нормальном к его простиранию, будет действовать главное напряжение наибольшего сжатия, высокий уровень которого определяет укорочение и утолщение континентальной коры в формирующемся орогене. Сделанные выводы однако не находят своего подтверждения ни в сейсмологических данных, ни в результатах тектонофизических исследований ЗС. Основные эти противоречия следующие: (1) Сейсмологические данные показывают, что механизмы очагов землетрясений, возникающих в океанской коре перед тальвегом желоба, являются сбросовыми, т.е. здесь в направлении, нормальном к простиранию зоны субдукции, действует напряжение наименьшего сжатия, а наибольшее сжатие ориентировано субвертикально (рис. 2а) [7]. (2) Тектонофизическая реконструкция напряжений, выполненная по сейсмологическим данным, показала, что в глубинной части слэба (100–400 км) в направлении его погружения действует наименьшее из главных сжимающих напряжений (рис. 2б) [1].

Кроме того, выводы, следующие из базисных положений концепции тектоники литосферных плит, входят в противоречие со структурными особенностями строения орогенов тихоокеанского типа (ОТТ), формирующимся на активных континентальных окраинах, для которых главным считается [4–6]: 1) наличие мощной аккреционной призмы; 2) региональный метаморфический пояс (мощность 2 км), пояс гранитоидных батолитов (мощность 15 км) и пояс кислых вулканических пород шириной 200–300 км; 3) мощный вулканизм, проявляющийся как на внутриокеанических дугах прямо над океанической литосферой, так и над континентальной плитой на расстояниях 400–600 км от тальвега океанского желоба; 4) утолщенная континентальная кора орогена. Орогенез начинается с субдукции, активного вулканизма и аккреции океанических пород. Важную роль в формировании ОТТ играют тектоническая эрозия, к которой относят фронтальную и базальную эрозию, а также прогрессивный метаморфизм, происходящий в эродированном коровом материале при его перемещении вдоль поверхности океанской коры до глубин 60 км [8]. Далее идет эксгумация и выдавливание вверх метаморфизированных пород на уровень средней коры с формированием купольного поднятия амагматической дуги, а также подъем астеносферы и

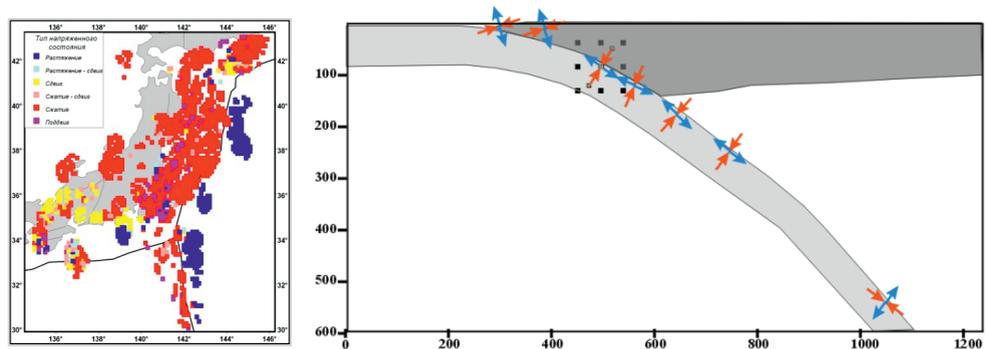


Рис. 2. Геодинамический тип напряженного состояния в коре японской зоны субдукции (а) и ориентация осей наибольшего (красный цвет) и наименьшего (синий) сжатия для вертикального профиля вдоль 30° Южно-Американской зоны субдукции (б).

отделение области ОТТ типа от континента. Для зон субдукции западного фланга тихоокеанской сейсмофокальной области характерно наличие на глубинах 400–600 км субгоризонтально лежащих стагнант блоков с горизонтальной протяженностью в 700 и более километров.

Указанные структурные особенности ОТТ добавляют еще три важных противоречия с базисными положениям концепции тектоники литосферных плит: (3) Погружение осадочной аккреционной призмы на глубины до 60 км невозможно в условиях высокого уровня горизонтального сжатия на границе между погружающейся океанской литосферой и континентальной литосферой. (4) Высокий уровень горизонтального сжатия, который будет действовать с самого начала субдукции океанской литосферы, не позволит сформироваться вулканическим процессам, т.к. давление магмы в магмопроводящих каналах в верхней части коры не способно продвинуть магму вверх в коре с напряженным состоянием горизонтального сжатия [3]. (5) Формирование на посторогенной стадии ОТТ задугового моря также невозможно объяснить в рамках модели с высоким уровнем напряжений горизонтального сжатия в океанской литосферной плите. Для формирования: А) растяжения в тылу островной дуги на посторогенной стадии; Б) проявления вулканизма на поверхности континентальной коры в переходной и основной стадиях; В) затягивания осадочной аккреционной призмы вниз на начальной стадии необходимо допустить возможность надвигания континентальной литосферы на океанскую (рис. 3), т.е. действие механизма ролл-бэк [2]. Также необходимо чтобы на всех стадиях процесса формирования ОТТ в океанской литосфере не было напряжений большого горизонтального сжатия, действовавших по нормали к простиранью ЗС, т.е. океанский спрединг является пассивным (рис. 3). Это и подтверждают сейсмологические данные и результаты тектонофизической реконструкции напряжений. Заметим, что из результатов тектонофизической реконструкции глобального поля тектонических напряжений [2] также следует, что в направлении от ЗОС до ЗС в океанической коре наибольшее горизонтальное напряжение действует параллельно простиранью этих структур. Таким образом, нет давления в ЗОС и касательных напряжений в направлении ЗС на подошве океанской литосферы. Следует отметить, что механизм ролл-бэка хорошо объясняет формирование стагнант блоков. При этом не требуются амплитудные горизонтальные смещения слэба, стагнант блок фактически образуется

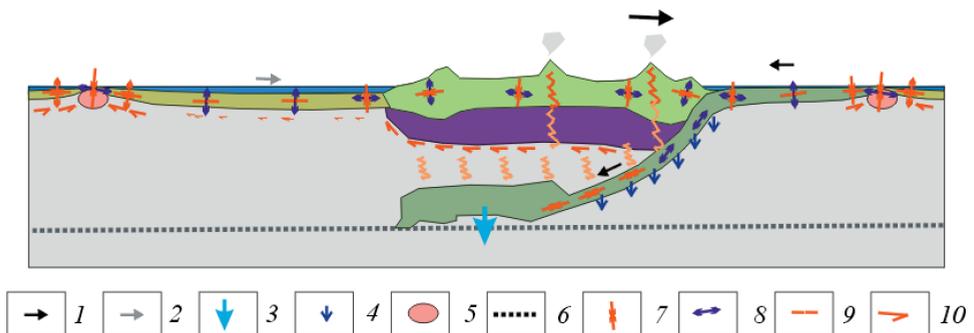


Рис. 3. Активные силы и напряжения в рамках концепции тектоники пассивного океанского спрединга и определяющей роли вертикальных сил в механизме ролл-бэка в зонах субдукции.

за счет вертикального опускания слэба при небольшой компоненте скатывания по «астеносферному склону».

Вопросы формирования напряжений горизонтального сжатия в коре ОТТ мы связываем с процессами вулканизма и тектонической эрозией, а объяснение увеличения мощности коры связано с выплавками базальтов, происходящими после поступления воды в континентальную кору из мантии над стагнант блоком и погруженной океанской литосферы (слэб) в зоне субдукции.

*Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.*

- [1] Романюк Т.В., Ребецкий Ю.Л. Плотностные неоднородности, тектоника и напряжения Андийской субдукционной зоны на 21° ю.ш. II. Тектонофизическая // Физика Земли, 2001, № 2, с. 23–35.
- [2] Ребецкий Ю.Л. Поле глобальных коровых напряжений Земли // Геотектоника, 2020, № 6, с. 3–24.
- [3] Ребецкий Ю.Л. О механизмах генерации избыточного горизонтального сжатия в континентальной коре // Физика Земли, 2023, № 3, с. 63–77.
- [4] Dewey J.F., Bird J.M. Mountain belts and the new global tectonics // J. Geophys. Res., 1970, V. 75, p. 2625–2647.
- [5] Maruyama S., Liou J.G., Terbayashi M. Blushchist and eclogites of the world, and their exhumation // Intern. Geol. Rev., 1996, V. 38, p. 485–594.
- [6] Miyashiro A., Aki K., Sengor A.M.C. Orogeny. John Wiley&Sons, 1982, 242 p.
- [7] Rebetsky Yu.L., Polets A. Yu., Zlobin T.K. // Tectonophysics, 2016, V. 685, p. 60–76.
- [8] Yamamoto S., Senshu H., Rino S., Omori S., Maruyama S. Granite subduction, tectonic erosion and sediment subduction // Gondwana Res., 2009, V. 15, p. 443–453.

## НОВЫЙ МАКСИМАЛЬНЫЙ ПРИНЦИП В РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕКТОНОФИЗИКИ

Ю.Л. Ребецкий

Москва, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
reb@ifz.ru

Главной обратной задачей тектонофизики является реконструкция тектонических напряжений из данных о совокупности сколовых разрывов (геологические индикаторы) или из механизмов очагов землетрясений (сейсмологические индикаторы). После работ О.И. Гушенко [1] в СССР и работ Ж. Анжелье во Франции [4] методы реконструкции напряжений из данных о зеркалах скольжения и механизмах очагов землетрясений получили мощный импульс к развитию. Это было связано с использованием гипотезы Валлеса и Ботта [6, 12], определяющей, что направление смещения борозды скольжения на разрыве стремится совпасть с направлением касательных напряжений, которые действовали на плоскости разрыва до начала формирования разрывного смещения (рис. 1а).

Можно показать [2] нахождение наилучшего приближения совокупности зеркал скольжения тензору напряжений связано с определением ориентации осей главных напряжений и формой эллипсоида напряжений, т.е. значением коэффициента Лоде – Надаи, поскольку:

$$\sigma_{ns} = \tau \left[ (1 - \mu_\sigma) l_{n1} l_{s1} - (1 + \mu_\sigma) l_{n3} l_{s3} \right] \quad (1)$$

где  $\tau$   $\sigma_{ns}$  соответственно максимальное касательное напряжение и касательное напряжение на плоскости зеркала скольжения с нормалью  $\mathbf{n}$  в направлении вектора смещения  $\mathbf{s}$ , а  $l_{nk}$  и  $l_{sk}$  – направляющие косинусы векторов  $\mathbf{n}$  и  $\mathbf{s}$  в системе координат главных осей искомого тензора напряжений  $\sigma_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ).

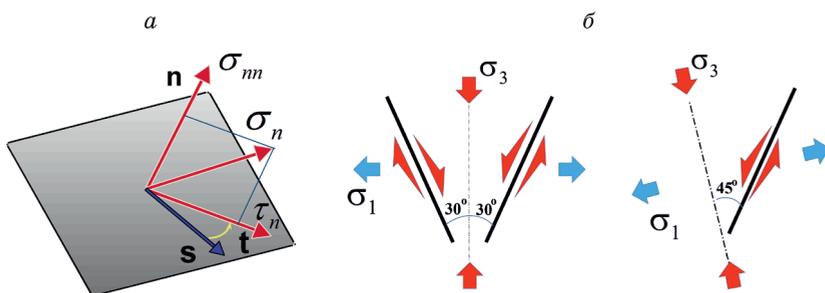


Рис. 1. Соотношение параметров зеркал скольжения с напряжениями: (а) гипотеза Валлеса и Ботта [6, 12]; (б, в) новый максимальный принцип в случае наличия двух сопряженных пар ЗС (б) и в случае одной (в).

Используя гипотезу Валлеса и Ботта, можно обратную задачу тектонофизики по нахождению параметров тензора напряжений из данных о совокупности сколов со смещениями их бортов свести к нахождению максимума функций следующего типа:

$$F_1 = \sum \frac{s_n^i t_n^i}{s_n^i t_n^i} \quad F_2 = \sum \frac{s_n^i t_n^i}{s_n^i} \quad F_3 = \sum s_n^i t_n^i \text{ при } F_m \rightarrow \max \quad (2)$$

Здесь  $s_n^i$   $t_n^i$  – соответственно вектор смещения и вектор касательного напряжения на  $i$ -ом разрыве ( $i=1, \dots, L$ ) с нормалью  $\mathbf{n}$  из выборки зеркал скольжения (ЗС), а  $s_n^i$  и  $t_n^i$  их нормы. Искомый тензор напряжений определяется как средний по объему и интервалу времени, который при этом он наилучшим образом удовлетворяет совокупности ЗС, наблюдаемым в таком четырехмерном пространстве. Первая функция (2) представляет собой сумму скалярных произведений нормированных векторов  $s_n^i$   $t_n^i$ . Ее максимум определяет нахождение напряжений из условия минимальности суммы углов между векторами  $s_n^i$  и  $t_n^i$ . В работах [4, 7–9] для нахождения осей главных напряжений и формы эллипсоида напряжений использовалась функция  $F_1$ . При расчетах напряжений на основе этой функции было замечено, что максимум ее значений имеет достаточно пологую форму, что говорит о малых ее изменения при достаточно широком изменении углов главных осей напряжений. В силу этого в работах [3, 10, 5] для нахождения осей главных напряжений было предложено использовать функцию  $F_2$ . Вторая функция (2) представляет собой сумму касательных напряжений на площадках скальвания из выборки трещин в направлении смещений  $s_n^i$

$$F_2 = \sum \sigma_{ns}^i \quad (3)$$

т.е. здесь больший вес при суммировании будут иметь сколы, расположенные ближе к площадкам действия максимальных касательных напряжений. Третья функция может быть использована в тех случаях, когда известны амплитуды подвижек или когда мы можем предположить взаимосвязь амплитуд подвижек с напряженным состоянием. Она с точностью до нормировки на линейный размер объема деформирования ( $L$ ) представляет собой работу касательных напряжений на разрывных смещениях, т.е. является аналогом мощности диссипации упругой энергии, возникающей при создании необратимых деформаций и может быть записана в следующем виде:

$$F_3 = S_{kk} \sigma_k, \text{ где } k = 1, 2, 3.. \quad (4)$$

где  $S_{kk}$  – компоненты тензора сейсмостектонических деформаций, а  $\sigma_k$  – главные напряжения. Вид функции совпадает с мощностью диссипации в теории пластичности, но для хрупко-упругого тела ее следует рассматривать как мощность снимаемой упругой энергии, а достижение максимума  $F_3$  отвечает принципу Гамильтона.

Важно обратить внимание на тот факт, что в случае использования функций  $F_2$  может иметь место систематическая ошибка. Она будет проявляться, когда вместо сопряженной пары (системы) сколов мы имеем данные только об одной группе близко расположенных полюсов сколов (вторая отсутствует). Тогда в результате расчетов будет получено такое расположение осей главных напряжений, при котором группа близко расположенных полюсов сколов окажется вблизи площадок

действия максимальных касательных напряжений (рис. 1б). Это произойдет из-за повышения веса площадок сколов с большими значениями касательных напряжений. Появление сколов для второй сопряженной системы будет уменьшать отклонение главных напряжений от их правильного положения. В случае, когда в число трещин в сопряженных системах сопоставимо, такое отклонение осей главных напряжений не происходит (рис. 1в).

Следует отметить, что когда оценка напряжений выполняется по сейсмологическим данным, то необходимо сделать выбор между двумя нодальными плоскостями, указав, какая из них является очагом землетрясения. Во всех алгоритмах расчета напряжений [2] в таком случае используется гипотеза о том, что очагу землетрясений отвечает плоскость с наибольшим значением касательных напряжений. Как это ясно из примера рис. 1б, в эта гипотеза также приводит к систематическим ошибкам.

В методе катакластического анализа разрывных смещений [2, 11] для выбора реализованной нодальной плоскости в виде очага землетрясения предложено использовать критерий:

$$\tau_C^1 > \tau_C^2 \text{ при } \tau_C^k = \tau_n^k + k_f \sigma_{nn}^{*k}, \sigma_{nn}^{*k} = \sigma_{nn}^k + p_f < 0. \quad (5)$$

где  $\tau_C^k$  – кулоновы напряжения на нодальной плоскости  $k$  ( $k = 1, 2$ ),  $k_f$  – коэффициент трения, а  $\tau_n^k$  и  $\sigma_{nn}^{*k}$  – касательное напряжение и эффективное нормальное сжимающее напряжение ( $p_f$  – флюидное давление в трещинах и порах). Здесь и далее используется правило знаков, принятое в механике сплошной среды – напряжение растяжения положительное. Такой подход оказался успешным и прошел проверку для многих сильных землетрясений, для которых из геологических или сейсмологических данных известна плоскость очага [2]. В последние годы в МКА проходил проверку **новый вид максимальной функции**, определяемой следующим образом:

$$F_4 = \sum s_n^i (\sigma_{ns}^i - k_f |\sigma_{nn}^{*i}|) = S_{kk} \sigma_k - k_f \sum s_n^i |\sigma_{nn}^{*i}| \rightarrow \max k = 1, 2, 3. \quad (6)$$

Эта функция характеризует энергию, высвободившуюся в виде упругих волн для совокупности сколов или землетрясений, и рассчитывается как разница энергии упругой разгрузки на совокупности хрупких смещений по трещинам (функция  $F_3$  в выражениях (2, 4)) и работе, совершаемой на преодолении сил трения (мера мощности энтропии). Опыт проведенных реконструкций с использованием данной функции показал хорошие результаты. В докладе будут показаны результаты таких реконструкций напряжений для нескольких сейсмоактивных регионов.

*Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.*

- [1] Гущенко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // ДАН СССР. Сер. геофиз, 1975, Т. 225, № 3, с. 557–560.
- [2] Ребецкий Ю.Л. Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристикам трещин // Дис. док. физ.мат. наук. М.: Изд. ОИФЗ, 2003, 455 с.

- [3] Юнга С.Л. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры. Изв. АН СССР сер. Физика Земли, 1979, с. 14–23.
- [4] Angelier J. Determination of the mean principal stresses for a given fault population, *Tectonophysics*, 1979, 56, p. 17–26.
- [5] Angelier J. Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress IV – a new method free of choice among nodal lines // *Geophys J Int*, 2002, 150, p. 588–609
- [6] Bott M.H.P. The mechanics of oblique slip faulting // *Geol. Mag*, 1959, N 96, p. 109–117.
- [7] Carey E., Bruneier B. Analyse theorique et numerique d'un modele mecanique elementaire applique a l'etude d'une populaton de failles // *C. R. Acad. Sci. Paris. D*, 1974, V. 279, p. 891–894.
- [8] Gephart J.W., Forsyth D.W. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence // *J. Geophys. Res*, 1984, V. 89, NO B11, p. 9305–9320.
- [9] Lund B, Slunga R. Stress tensor inversion using detailed microearthquake information and stability constraints: application to Ölfus in southwest Iceland // *J Geophys Res*, 1999, 104, p. 14947–14964
- [10] Michael A.J. Determination of stress from slip data: faults and folds // *J Geophys Res*, 1984, V. 89, p. 11517–11526.
- [11] Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu. The method of cataclastic analysis of discontinuous displacements. *Moment Tensor Solutions – A Useful Tool for Seismotectonics* / Editor Sebastiano D'Amico. Springer. Cham, 2018, p. 111–162.
- [12] Wallace R.E. Geometry of shearing stress and relation to faulting // *J. Geol*, 1951, N 59, p. 118–130.

## ОТРАЖЕНИЕ ОТ ЖЁСТКОЙ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ГРАНИЦЫ

Е.Б. Сибиряков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирск, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

<sup>2</sup>Новосибирск, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
sibiryakoveb@ipgg.sbras.ru

В работе предложен полуаналитический метод решения краевых задач смешанного типа для двухмерного уравнения Гельмгольца в слоистой среде с криволинейными границами. При этом решения краевой задачи сводится к вычислению интегралов.

Обычно при решении обратных коэффициентных задач предполагают, что источником поля является идеальная дельта-функция [1]. Это предположение уместно в случае достаточно коротких волн. Однако, в случае достаточно длинных волн это предположение не перестаёт быть адекватным. Как было показано в [2], для решения упругой коэффициентной обратной задачи необходимо знать нагрузку на верхней поверхности, порождающую перемещения, и перемещения, являющуюся откликом на нагрузку. Для проверки качества решения обратной задачи в этом иногда достаточно по перемещениям и свойствам среды восстановить нагрузку на внешней поверхности.

Зачастую уравнение Гельмгольца рассматривается как простая аналогия решения задач упругих стационарных колебаний. При этом функция считается аналогом перемещения, а её нормальная производная на внешней границе аналогом нагрузок. Одним из способов решения обратных задач заключается в выборе из достаточно большого количества решений прямых задач, обеспечивающих экстремум подходящему функционалу [3]. При этом использование разностных схем для решения прямых задач приводит к необходимости выставления граничных условий на несуществующих границах, что приводит к ложным отражениям. Самым распространённым методом решения краевых задач в настоящее время является метод конечных элементов (МКЭ). Главным его достоинством является минимальное расходование вычислительных ресурсов из-за использования упрощённых алгоритмов обращения разреженной матрицы. Однако, его недостатки являются продолжением его же достоинств. Фактическое проведение границ там, где их на самом деле нет, редко остаётся без последствий. Ухудшение обусловленности при увеличении количества узлов в сетке порождает необходимость использования регуляризационных процедур при использовании этого метода [1]. Это приводит к мысли, что было бы очень желательно иметь возможность использовать альтернативные методы решения некоторых видов упругих задач.

Задача состоит в том, чтобы найти решение двухмерного уравнения Гельмгольца в среде, где на верхней поверхности задана какая-либо нагрузка,

$$\varphi_{zz} + \varphi_{xx} + k^2\varphi = 0 ; \quad \frac{\partial\varphi}{\partial z}(0, x) = p(x) .$$

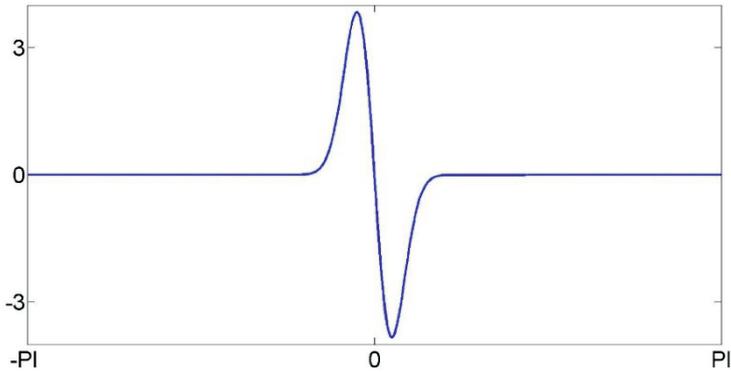


Рис. 1. Нормальная производная функции на внешней поверхности.

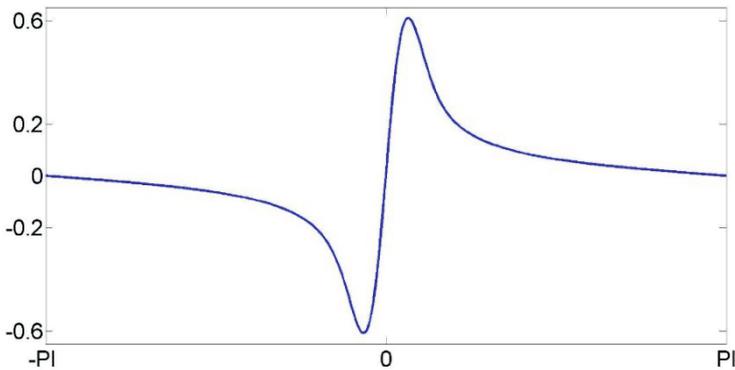


Рис. 2. Функции на внешней поверхности, в безграничной среде, имеющая на этой же поверхности нормальную производную, изображённую на рис. 1.

на границе раздела выполняются условия по непрерывности функции и её нормальной производной. Для простоты будем считать параметр  $k$  заданным, а нижнюю границу бесконечно жёсткой (функция на этой границе обращается в ноль). Задача состоит в том, чтобы найти функцию на внешней границе как отклик среды на аналог нагрузки. Нормальная производная на свободной границе обычно локализована и является управляемым параметром. Пусть интервал, в котором проводятся измерения, находится в промежутке  $x \in [-\pi; \pi]$  Функция может быть представлена на этом интервале в виде разложения:

$$\varphi(0, x) = \varphi_0 + \sum_{i=1}^N \varphi_{ic} \cos(ix) + \sum_{i=1}^N \varphi_{is} \sin(ix).$$

задача состоит в том, чтобы найти зависимости коэффициентов разложения от переменной  $z$ . При этом производные вычисляются аналитически. Это даёт возможность вычислить функцию всюду в объёме, в том числе и на верхней поверхности. Пусть нормальная производная от функции на свободной границе имеет вид:

$$p(x) = -40x \exp(-20x^2).$$

а представлена на рис. 1. Эта функция раскладывается только по синусам.

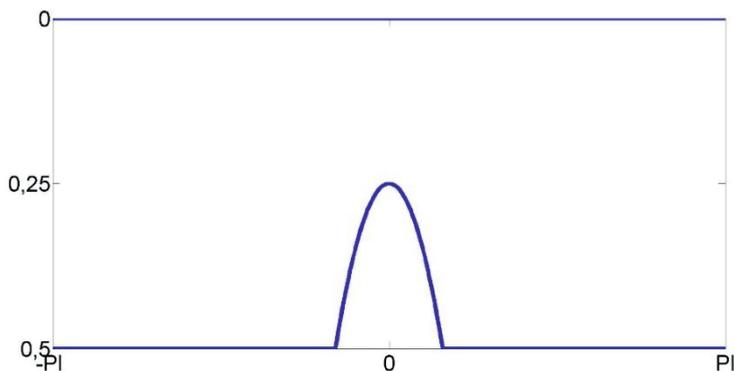


Рис. 3. Границы раздела.

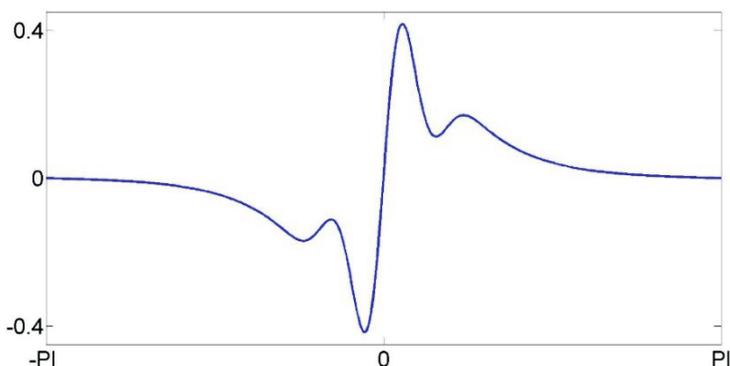


Рис. 4. Функции на внешней поверхности, в среде, параметром  $k = 2.5$  и жёсткой границей, представленной на рис. 3.

При этом в безграничной среде в статике ( $k = 0$ ) зависимость коэффициентов разложения от глубины очень простая  $\phi_{is}(z) = \exp(-iz)$  перемещения порождаемые этой нормальной производной, представлены на рис. 2.

Пусть есть жёсткая граница раздела, описываемая уравнением:

$$z = 0.5 - 0.25(1 - 4x^2), x \in \left[-\frac{1}{2}; \frac{1}{2}\right], \text{ на представлена на рис. 3.}$$

Положим параметр  $k = 2.5$  и вычислим функцию в объёме, используя метод граничного элемента, аналогично [5]. При этом, если ядро представить в виде конечного аналога дельта-функции и разложить ряд, то решение сведётся к вычислению суммы интегралов по причине ортогональности тригонометрических функций на интервале. Функция представлена на рис. 4.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИНГТ СО РАН, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.*

[1] Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи. Учебник для студентов высших учебных заведений. Новосибирск. Сибирское научное издательство, 2009, 457 с.

- [2] Ватульян А.О., Плотников Д.К. Обратные коэффициентные задачи в механике // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика, 2019, № 3, с. 37–47
- [3] Сибиряков Е.Б. Коэффициентная обратная задача для уравнения Гельмгольца. Геофизические технологии, 2022, № 3, с. 77–84.
- [4] Иванов К.М., Винник П.М., Иванов В.Н. Численное моделирование разделительных процессов обработки давлением // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2012, № 2(33), с. 192–199.
- [5] Сибиряков Е.Б. О детектировании шероховатых границ. Физическая мезомеханика, т. 20, № 6, Томск, 2017, с. 98–104.

## НЕОБРАТИМАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД С ДЕФЕКТАМИ

Ю.П. Стефанов<sup>1, 2</sup>, Р.А. Бакеев<sup>2, 1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирск, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
yu\_st@mail.ru,

<sup>2</sup> Томск, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Горные породы в природе нередко испытывают периодически меняющуюся нагрузку, в результате которой могут накапливаться повреждения и изменяться их механические свойства. При исследовании поведения горных пород часто используются схемы многостадийного, а также циклического нагружения. Данные исследования предполагают частичную или полную разгрузку образцов с повторным нагружением, не доводя его до разрушения. Результаты таких испытаний показывают нелинейный характер поведения образцов не только на этапе нагружения, но и при разгрузке. Неоднородная структура, большое количество микротрещин и, как следствие наличие внутренних напряжений приводит к сложному нелинейному поведению горных пород. Необычный характер кривой нагружения часто наблюдается и в начале разгрузки, когда рост деформации происходит при снижении нагрузки, что обычно характерно для запредельной стадии нагружения, когда развивается разрушение образцов. Кроме того, в экспериментах часто наблюдают гистерезис, когда диаграмма нагружения и разгрузки не совпадают. Очевидно, что данные особенности поведения связаны с накоплением повреждений и остаточными напряжениями в результате развития необратимой деформации, а также реологическими свойствами.

На примере деформирования образца горной породы с трещиноподобным дефектом показано, что развитие необратимой деформации происходит не только при активном нагружении, но и при разгрузке. В окрестности дефекта формируются остаточные напряжения, которые расположены вблизи областей интенсивного роста деформации.

Особенностью процесса является развитие необратимой деформации на этапах активного нагружения и разгрузки происходят в разных, расположенных рядом областях. В ходе деформирования на каждом последующем цикле наблюдалось постепенное развитие зон локализованной деформации, что, по сути, являлось ростом трещинообразного дефекта. Эти особенности поведения тела с дефектами могут проявляться в виде гистерезиса диаграмм нагружения. Важным следствием развития деформации на этапах нагружения и разгрузки может быть изменения механических свойств горных пород, которые имеют неоднородную структуру и содержат множество разномасштабных дефектов.

*Математическая модель, алгоритмы моделирования и обработки результатов разработаны в рамках госзадания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0002. Постановка задачи и интерпретация результатов проведены в рамках госзадания ИНГГ СО РАН, проект ФНИ FWZZ-2022-0021.*

**ОЦЕНКИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОН НЕОБРАТИМОЙ ДЕФОРМАЦИИ  
И ПОЛОС ЛОКАЛИЗОВАННОГО СДВИГА ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ  
ЗЕМНОЙ КОРЫ В УСЛОВИЯХ СЖАТИЯ И СДВИГА**

**Ю.П. Стефанов<sup>1,2</sup>, А.А. Татаурова<sup>1</sup>, Р.А. Бакеев<sup>2,1</sup>**

<sup>1</sup> Новосибирск, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
yu\_st@mail.ru,

<sup>2</sup> Томск, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

В докладе рассмотрено влияние соотношения прочностных свойств и условий деформирования на зарождение и развития полос локализованного сдвига. Рассмотрен ряд примеров моделирования процессов деформации в геологической среде. Показано, что конфигурация разломной зоны в верхних слоях земной коры в значительной мере зависит как от свойств пород, в первую очередь, внутреннего трения и порового давления, так и от соотношений между главными компонентами напряжений. От этих факторов зависит также расположение очагов зарождения необратимой деформации и направление развития зон локализации деформации. В определенных случаях первичные структуры нарушений формируются на поверхности и развиваются вглубь на ограниченную глубину, в то время как, основные разломы могут развиваться снизу и иметь большую амплитуду смещений. Показаны примеры оценок формирования возможных очагов развития необратимой деформации и полос локализованного сдвига в условиях горизонтального сжатия, а также продольного сдвига. Проведено сопоставление результатов численного моделирования с оценками начальной стадии развития необратимой деформации и зарождения зон локализации.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИНГГ СО РАН, проект ФНИ FWZZ-2022-0021.*

## ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ПАЛЕО И ИСТОРИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

А.А. Стрельников

Москва, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
aas@ifz.ru

Иссык-Кульская область – территория интенсивного экономического развития, третья по численности населения в Киргизской Республике. Здесь расположено большое количество объектов современного строительства, развивающейся инфраструктуры, ведется ежегодное расширение курортных зон, сельскохозяйственной активности.

Несмотря на наличие современной системы мониторинга и регистрации сейсмических событий остается открытым вопрос о периодизации высокомагнитудных землетрясений. Это необходимо для возможности дальнейшего расчета возможного физического и экономического ущерба, а также готовности к ликвидации последствий сейсмического события. Для получения ответа на данную тему используются научные изыскания из раздела архео- и палеосейсмологии [1].

Регион Иссык-Кульской внутригорной котловины и прилегающих к ней территорий впервые относительно полно изучен с точки зрения современной архео- и палеосейсмологии. Скорректирована оценка сейсмической опасности регионов возможных восьмибалльных землетрясений на юге и востоке впадины до девятибалльного уровня на карте сейсмического районирования территории Киргизской Республики 2018 года [2]. Впервые получены данные о кластеризации землетрясений на севере Иссык-Кульской впадины – периоды активного выделения сейсмической энергии сменяются периодами сейсмического затишья [3]. Отмечена приуроченность очагов сильных палеоземлетрясений не только к магистральным глубинным разломам и ответвляющимся от них краевым разломам, но и к предгорным разломам, которые в свою очередь ответвляются от краевых разломов [4].

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.*

- [1] Дж. Мак-Калпин. Палеосейсмология. В 2-х томах. Пер. с англ. под ред. А.Л. Строма. – М.: Научный мир, 2011, т. 1, 560 с, т. 2, 400 с.
- [2] Стрельников А.А., Корженков А.М. Разрушение средневековых археологических памятников сильными землетрясениями в юго-восточной части Иссык-Кульской впадины, Тянь-Шань // Вопросы инженерной сейсмологии, 2020, т. 47, № 3, с. 54–73.
- [3] Корженков А.М., Стрельников А.А., Деев Е.В., Корженкова Л.А., Лю Ц., Мажейка Й.В., Рогожин Е.А., Родина С.Н., Турова И.В., Усманова М.Т., Фортуна А.Б. Адырные разломы – генераторы сильных землетрясений в Иссык-Кульской кот-

ловине (на примере зоны Культорского разлома) // Вопросы инженерной сейсмологии, 2020, т. 47, № 2, с. 19–40.

- [4] Корженков А.М., Деев Е.В., Турова И.В., Абдиева С.В., Иванов С.С., Лю Ц., Мажейка Й.В., Рогожин Е.А., Стрельников А.А., Фортуна А.Б., Усманова М.Т. Активная тектоника и палеосейсмичность восточной части Иссык-Кульской котловины (Кыргызстан, Тянь-Шань) // Геология и геофизика, 2021, т. 62, № 3, с. 329–347.

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ СЕЙСМО-ГРАВИТАЦИОННЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ  
ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ  
И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ УРАЛА  
И АЛТАЕ-САЯНСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ (ПРОФИЛЬ КВАРЦ)**

**В.Д. Суворов, Е.А. Мельник, Е.В. Павлов**

*Новосибирск, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
SuvorovVD@ipgg.sbras.ru*

Профиль Кварц длиной около 4000 км с тремя ядерными взрывами, пересекает в юго-восточном направлении Предуральский прогиб с Уралом, Западно-Сибирскую плиту (ЗСП) и входящего в Алтае-Саянскую складчатую область (АССО) [1]. В непосредственно сферическом приближении формы Земли методом лучевого трассирования распространения преломленно-рефрагированных и отраженных продольных волн [17] построена двумерная сейсмическая модель верхней мантии. Обнаружены региональные структурно-скоростные неоднородности двухслойной мантийной литосферы с уменьшением ее мощности в сторону складчатой области при соответственно увеличивающейся мощностью астеносферы.

Существенно, что полученные результаты в целом значительно отличаются от многочисленных публикаций российских и зарубежных авторов, где использовано преимущественно условно двумерное моделирование преломленных волн [13, 14, 16] и отраженных [2, 6, 7, 11], без учета взаимных времен пробега преломленных и отраженных волн. Результаты представлены в виде многослойных двумерных моделей не подтвержденных распределением лучевых траекторий при отсутствии полного анализа соответствия наблюдаемых и модельных времен пробега волн.

### **Результаты**

Мощность верхнего слоя мантии уменьшается от 200–210 км под Уралом до почти 100 км в области сочленения ЗСП и АССО, что коррелируется с соответствующим утолщением астеносферы от 50–70 км до 170–180 км при с эффективной скоростью около 8.5 км/с, определенной по данным близкритических отражений от кровли и подошвы в комплексе с первыми вступлениями. Глубина границы «410 км» с граничной скоростью 9.0 км/с оценивается в центральной части профиля величиной около 400 км.

Слой залегающий в основании литосферы мощностью 70–90 км характеризуется повышенной до 8.6–8.8 км/с скоростью в северо-западной части профиля на участке протяженностью около 1000 км. В юго-восточном направлении скорость понижается до 8.4–8.7 км/с.

В области в центральной части профиля в верхнем слое мантии локализуется участок протяженностью около 500 км и мощностью до 130 км с аномально повышенной до 8.0–8.3 км/с скоростью. Он разделяет северо-западную зауральскую часть ЗСП от юго-восточной с выходом в АССО, различающимися мантийными

характеристиками. В северо-западном блоке верхнего неоднородного слоя мантии мощностью около 170 км скорость увеличивается с глубиной от 7.8 до 8.2 км/с. В юго-восточном блоке длиной около 1000 км и мощностью 70–90 км скорость понижена до примерно таких же значений 7.8–8.1 км/с, но при значительно более высоком градиенте ее изменения.

Юго-восточное ограничение аномального верхнемантийного блока протяженностью около 100 км коррелируется с положением Колтогорско-Уренгойского грабен рифта. Северо-западное его ограничение коррелируется с западной границей мегазоны II, относящейся к континентальному шельфу с экстремально мелководными карбонатно-терригенными отложениями палеозоя [4]. Эта мегазона пересекается профилем в юго-восточном направлении и выходит в АССО также представленную палеозойскими отложениями [3], что коррелируется с вертикально неоднородным вторым слоем верхней мантии (скорость 8.3–8.7 км/с), расположенном на минимальной глубине 110–200 км, но при максимальной мощности астеносферы около 180 км на глубине 200–380 км.

Расположенная на северо-западном участке профиля мегазоны III [4] в виде Украинного моря Палеоазиатского океана протяженностью около 500 км представлена осадочными отложениями позднего девона-перми. В разрезе мантии этот участок характеризуется пониженной до 7.8–8.2 км/с скоростью, как и в мегазоне II, но при повышенной до 8.6–8.8 км/с скоростью в подстилающем (втором) слое, погруженном на глубину 200–280 км.

### **Сейсмогравитационные неоднородности литосферы**

Дополнительная информация о характере распределения аномалий скорости в верхах мантии содержится в плотностных неоднородностях, выраженных в остаточных аномалиях гравитационного поля Буге, пересчитанного на границу Мохо с учетом структуры земной коры. Такая процедура реализована программой ADG3D [5] с примером ее применения [8]. Исходными данными являлись спутниковые цифровые модели дневного рельефа DNSCO8 [9] и гравитационного поля WGM2012 со среднеквадратической погрешностью  $\pm 3$  мГал [10].

Соотношение между аномалиями Буге и остаточной его компоненты на Мохо показывает значительный вклад земной коры ЗСП в локальные высокочастотные аномалии до 100 мГал при региональном понижении поля на 100–150 мГал с уменьшением до 20–50 мГал в области Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и повышении в среднем на 20 мГал в АССО. Локальная положительная аномалия поля коррелируется с участком повышенной скорости в верхах мантии.

Сложное распределение региональных остаточных гравитационных аномалий наблюдается в их корреляции с сейсмическими неоднородностями в виде ступенчатых локальных изменений поля, в целом понижающегося в юго-восточном направлении вне зависимости от рельефа Мохо. В частности, например, Колтогорско-Уренгойский грабен рифта характеризуется локальной аномалией, коррелирующей с границей мегазон, разделяющих палеозойские породы различного возраста [3, 4].

Понижение остаточных гравитационных аномалий вдоль профиля коррелируется с уменьшением мощности мантийной литосферы до 50–70 км под юго-восточной частью ЗСП и северо-западной АССО при повышенной до 150–170 км мощности астеносферы. В целом локальные аномалии поля подчеркивают региональное

сейсмоструктурное тектоническое районирование верхней мантии ЗСП, пограничных областей ВЕП, Урала и АССО.

*Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № FWZZ-2022-0021 «Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики».*

- [1] Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год» [Электронное издание] // СПб.: ВСЕГЕИ, 2013, 94 с. URL: <http://www.vsegei.com/ru/info/seismic/12.04.2022>].
- [2] Егоркин А.В. Строение коры по данным сейсмических геотраверзов // Глубинное строение территории СССР. М.: Наука. 1991, с. 118–134.
- [3] Елкин Е.А., Сенников Н.В., Буслов М.М., Языков А.Ю., Грацианова Р.Т., Бахарев Н.К. Палеогеографические реконструкции западной части Алтае-Саянской области в ордовике, силуре и девоне и их геодинамическая интерпретация // Геология и геофизика, 1994, т. 35, № 7–8, с. 118–144.
- [4] Елкин Е.А., Конторович А.Э., Бахарев Н.К., Беляев С.Ю., Варламов А.И., Изох Н.Г., Каньгин А.В., Каштанов В.А., Кирда Н.П., Клец А.Г., Конторович В.А., Краснов В.И., Кривин В.А., Моисеев С.А., Обут О.Т., Сараев С.В., Сенников Н.В., Тищенко В.М., Филиппов Ю.Ф., Хоменко А.В., Хромых В.Г. Палеозойские фациальные мегазоны в структуре фундамента Западно-Сибирской геосинеклизы // Геология и геофизика, 2007, т. 48, № 6, с. 633–650.
- [5] Кочнев В.А., Васильев Д.В., Сидоров В.Ю. Пакет для решения прямых и обратных трехмерных задач гравиметрии ADG-3D // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 2011, № 2011611667.
- [6] Павленкова Г.А., Павленкова Н.И. Результаты совместной обработки данных ядерных и химических взрывов по сверхдлинному профилю Кварц (Мурманск-Кызыл) // Физика Земли, 2008, № 4, с. 62–73.
- [7] Павленкова Н.И., Павленкова Г.А. Строение земной коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами. М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС. 2014, 192 с.
- [8] Суворов В.Д., Мельник Е.А., Мишенькина З.Р., Павлов Е.В., Кочнев В.А. Сейсмические неоднородности верхней мантии под Сибирским кратоном (профиль Метеорит) // Геология и геофизика, 2013, т. 54, № 9, с. 1411–1426.
- [9] Andersen O.B., Knudsen P., Berry P.A.M., Kenyon S., Trimmer R. Recent developments in high-resolution global altimetric gravity field modeling // The Leading Edge, 2010, Vol. 29, № 5, p. 540–545.
- [10] Bonvalot S., Balmino G., Briais A., Kuhn M., Peyrefitte A., Vales N., Biancale R., Gabalda G., Reinquin F., Sarrailh M. World Gravity Map. Commission for the Geological Map of the World. BGI-CGMW-CNES-IRD. Paris. 2012.
- [11] Egorikin A.V., Zukanov S.K., Pavlenkova N.I., Chernyshev N.M. Results of lithospheric studies from long-range profiles in Siberia // Tectonophysics, 1987, № 140, p. 29–47.
- [12] Fuchs K. Upper mantle heterogeneities from active and passive seismology // NATO Science Series. Partnership Sub-series 1. Disarmament Technologies. Vol. 17. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. 1997, 366 pp.
- [13] Mechie J., Egorikin A.V., Fuchs K., Ryberg T., Solodilov L.N., Wenzel F. P-wave mantle velocity structure beneath northern Eurasia from long-range recordings along the

- profile Quartz // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1993, Vol. 79, № 1–2, p. 269–286.
- [14] Morozov, I.B., Morozova, E.A., Smithson, S.B., Solodilov, L.N. On the Nature of the Teleseismic Pn Phase Observed on the Ultralong-Range Profile “Quartz,” *Russia // Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998, № 88, p. 62–73.
- [15] Morozova E.A., Morozov I.B., Smithson S.B., Solodilov L.N. Heterogeneity of the uppermost mantle beneath Russian Eurasia from the ultra-long-range profile Quartz // *J. Geophys. Res.*, 1999, Vol. 104, №. B9, p. 20, 329-20, 348.
- [16] Ryberg F., Wenzel F., Mechie, J., Egorkin A.V., Fuchs K., Solodilov L.N. Two-Dimensional Velocity Structure beneath Northern Eurasia Derived from the Super Long-Range Seismic Profile Quartz // *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, Vol. 86, № 3, p. 857–867.
- [17] Zelt C.A., Smith R.B., Seismic travelttime inversion for 2-D crustal velocity structure // *Geophysical Journal International*, 1992, № 108 (1), p. 16–34.

## ИЗУЧЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАДВИГОВЫХ СТРУКТУР С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОДХОДА

А.А. Татаурова<sup>1</sup>, Ю.П. Стефанов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирск, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

<sup>2</sup>Томск, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

tataurovaa@ipgg.sbras.ru

В настоящее время численное геомеханическое моделирование широко применяется для задач геологии [1]. Оно позволяет оценить влияние различных параметров на формирование деформации в земной коре, а также определить механизмы образования тех или иных геологических структур. В работе уделено внимание формированию надвиговых структур в обстановке горизонтального сжатия. Проведена оценка влияния механических свойств среды, величины трения, а также наличие слоистости на формирование деформационных картин.

Задача решалась в двумерной постановке с использованием явной конечно-разностной схемы [2]. Поведение среды за пределом упругости описывалось моделью Друккера-Прагера-Николаевского с неассоциированным законом течения [3]. В расчетах учитывалось упрочнения и разупрочнения среды.

Для расчетов использовалась модель геологической среды прямоугольной формы. Нагружение проводилось в два этапа: сначала под действием гравитационных сил, затем подключались тектонические горизонтальные силы. Реализация последних осуществлялась за счет смещения одной из боковых границ. В основании среды было задано трение, которое позволяло модели среды скользить по жесткому основанию. Были рассмотрены варианты однородной и слоистой сред.

Результаты расчетов показывают, что прочностные свойства и коэффициент трения во многом определяют развитие полос локализованного сдвига, которые можно рассматривать как зоны разломов в случае больших смещений [4].

В случае, когда величина внутреннего трения превышает 0.4–0.5 полосы локализованного сдвига формируются вблизи дневной поверхности. При этом часто наблюдается как прямое, так и обратное падение полос локализованного сдвига. Полосы чаще всего не достигают подошвы массива и не приводят к существенному изменению рельефа дневной поверхности. Так как смещения в этом случае не значительные, то данные полосы сдвига можно предположительно интерпретировать как трещины или зоны ослабления пород.

При низких значениях коэффициента трения, меньше 0.4, развитие полос локализованного сдвига чаще всего происходит от подошвы массива в направлении дневной поверхности. При высоком трении на подошве слоя деформация часто не распространяется вдоль него, а остается сосредоточенной вблизи боковой границы модели, что приводит к локальному росту рельефа. Продвижение фронта деформации с формированием периодической системы полос наблюдается лишь при низком трении в основании или при его снижении в случае увеличения величины деформации.

В слоистой среде процесс формирования полос локализованного сдвига становится более сложным. Главная особенность состоит в том, что полосы локализованного сдвига могут развиваться в одном или нескольких слоях, что часто наблюдается в случае контрастных свойствах слоев модели. В хрупких породах сдвиговые деформации имеют более локализованный характер, чем в пластичных средах. Относительное скольжение таких слоев относительно друг друга создают сложные по конфигурации разломы.

Полученные результаты подтверждают, что полосы локализованного сдвига могут представлять собой различные геологические объекты, такие как разломы и трещины. Последние развиваются от дневной поверхности вглубь среды, не оказывая существенного воздействия на рельеф. Разломы пронизывают среду насквозь и формируют горные поднятия. Процесс образования разломов усложняется в случае слоистых сред, и приводит к их более сложной конфигурации.

*Работа выполнена в рамках проекта ФНИ FWZZ-2022-0021 «Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженнодеформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики».*

- [1] Ruh J.B. Numerical modeling of tectonic underplating in accretionary wedge systems // Geosphere, 2020, 16(6), p. 1385–1407.
- [2] Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag, 1999, 246 p.
- [3] Николаевский В.Н. Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучей среды // Прикладная математика и механика, 1971, № 35 (6), с. 1017–1029.
- [4] Тагаурова А.А., Стефанов Ю.П. Развитие необратимой деформации и полос локализованного сдвига при горизонтальном сжатии осадочного слоя // Геофизические технологии, 2022, № 2, с. 4–14.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА С СУЩЕСТВУЮЩИМИ ТРЕЩИНАМИ

С.Б. Турунтаев<sup>1</sup>, Е.В. Зенченко<sup>1</sup>, П.Е. Зенченко<sup>1</sup>,  
В.Ю. Начев<sup>1</sup>, Т.А. Чумаков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Москва, Институт динамики геосфер РАН, [stur@idg.ras.ru](mailto:stur@idg.ras.ru),

<sup>2</sup> Москва, Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)

Гидравлический разрыв пластов (ГРП), наряду с закачкой воды для поддержания пластового давления, является основным методом стимулирования добычи нефти и газа. Несмотря на существующие теоретические и экспериментальные исследования возникновения и распространения трещин гидроразрыва пласта [1, 2] остаются нерешенными фундаментальные проблемы корректного описания зарождения и развития трещины гидроразрыва в породах, характеризующихся естественной трещиноватостью и наличием тектонических разломов. Гидроразрыв в таких средах приводит к вовлечению естественных трещин в процессы фильтрации, естественные трещины оказывают влияние на распространение трещины ГРП, могут приводить к искривлению ее траектории и ветвлению, что отражается на итоговой эффективности проведения гидроразрыва [2, 3]. Первые работы, в которых детально исследовалось влияние естественных трещин на процесс распространения трещины гидроразрыва в трещиноватой среде, относятся к 1980-м годам [4]. В качестве основных факторов, определяющих поведение трещины гидроразрыва при контакте с естественной трещиной, отмечают величину напряжений, угол между плоскостями трещин, прочность породы на растяжение и коэффициент трения.

В докладе представлены результаты экспериментов по исследованию взаимодействия трещины гидроразрыва с заранее созданной трещиной, имитирующей естественную, а также с трещиной ГРП, полученной в результате ранее проведенных экспериментов.

Для отработки методики определения раскрытия трещины ГРП были проведены предварительные эксперименты по исследованию прохождения ультразвуковых волн через заполненную жидкостью щель контролируемой ширины, по результатам которых были построены зависимости уменьшения амплитуды ультразвуковой волны, прошедшей через трещину, от раскрытия трещины.

Основные эксперименты проводились на установке для моделирования ГРП, позволяющей проводить эксперименты на образцах искусственного пористого материала в форме дисков диаметром 430 мм и высотой 72 мм. Материал образцов подбирается в соответствии с критериями подобия. Установка позволяет нагружать образцы по трем независимым осям, насыщать образцы жидкостью, задавать градиенты порового давления, измерять поровое давление жидкости в нескольких точках, регистрировать акустическую эмиссию, зондировать образец ультразвуковыми импульсами [5].

Для изготовления образцов использовалась смесь 10 частей гипса и одной части портландцемента. Величина проницаемости составила 1,1 мД. Вопросы подобия модельного материала и параметров эксперимента применительно к гидроразрыву в полевых условиях, были рассмотрены в работах [5]. Образец изготавливался в два этапа. Сначала в камеру устанавливалась клиновидная вставка из полиметилметакрилата с углом клина  $40^\circ$  и заливалась смесь. Через сутки эта вставка вынималась, образовавшаяся наклонная поверхность смазывалась силиконовой жидкостью ПМС-1000. После этого оставшийся объем заполнялся второй порцией модельной смеси и проводилась сушка образца в течение 20 суток.

Перед заливкой образца в центральном отверстии нижнего диска размещалась латунная трубка диаметром 12 мм с заглушенным верхним торцом, имитирующая обсаженную скважину. На середине ее высоты имелась прорезь с затравкой прямоугольной формы высотой 10 мм и длиной 12 мм, изготовленная из двух слоёв латунной сетки с размером ячейки 0,3 мм. Затравка ориентировалась в сторону нарушения сплошности. Для формирования вспомогательных необсаженных скважин в нижнем диске устанавливались вставки из фторопласта, которые после затвердевания образца вынимались. Полученные скважины использовались для насыщения предварительно вакуумированного образца поровой жидкостью.

Для получения вертикальной трещины гидроразрыва в рабочую скважину с заданным постоянным расходом подавалась кремнийорганическая жидкость с кинематической вязкостью 200 сСт.

Было показано, что в условиях эксперимента естественная трещина влияет на распространение трещины ГРП (рис. 1). Было рассмотрено также взаимодействие трещины ГРП с другой трещиной ГРП, созданной ранее (рис. 2). Взаимодействие в рассматриваемых экспериментах происходило за счет утечек жидкости гидроразрыва в существующие ранее трещины. Трещины образовывали единую гидравли-

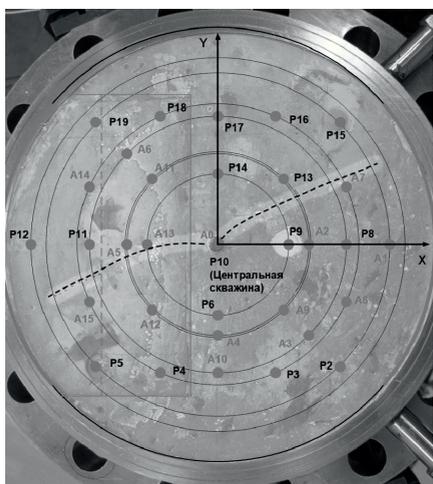


Рис. 1. Фото образца с наложением схемы расположения пьезопреобразователей и точек измерения порового давления, показывающая взаимодействие трещины ГРП с естественной трещиной.

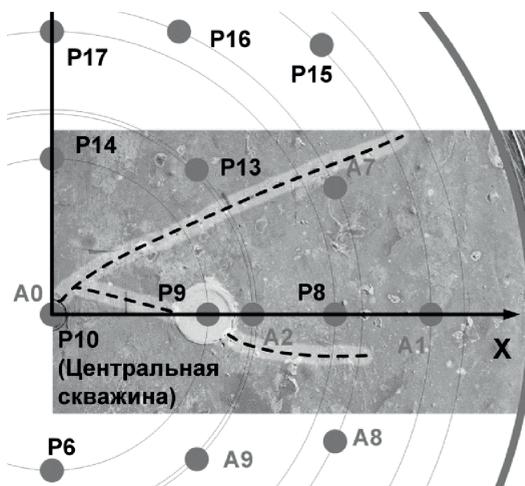


Рис. 2. Фото образца с наложением схемы расположения датчиков, показывающая взаимодействие двух трещин ГРП.



## СОДЕРЖАНИЕ

Акматов Д.Ж., Татаринов В.Н. Геомеханическое моделирование для обеспечения безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов . . . . .	3
Бакеев Р.А., Стефанов Ю.П. Влияние свойств горных пород и толщины осадочного чехла на форму структур нарушений при продольном сдвиге в основании . . . . .	5
Бакеев Р.А., Стефанов Ю.П., Мельник Е.А., Суворов В.Д., Татаурова А.А. Влияние геометрической постановки задачи на оценки напряженно-деформированного состояния . . . . .	8
Белобородов Д.Е., Тверитинова Т.Ю. Грязевой вулканизм Керченско-Таманской области как отражение активных неотектонических процессов . . . . .	9
Боголюбский В.А., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л. Структурная сегментация срединговых хребтов Приантарктической Атлантики . . . . .	11
Буслов М.М. Напряженно-деформационное состояние и сейсмотектоника Центральной Азии: эффект дальнего тектонического воздействия индо-евразийской коллизии . . . . .	15
Голиков Н.А., Назаров Л.А., Скулкин А.А., Назарова Л.А. Экспериментальное измерение деформационных и фильтрационных характеристик горных пород регулярно-блочной структуры . . . . .	19
Гравиров В.В. Сможет ли распределённое акустическое зондирование (DAS) заменить классические сейсмические приборы? . . . . .	20
Гравиров В.В., Лиходеев Д.В. Комплексная геофизическая система сбора информации, включающая в свой состав прецизионный мониторинг температуры горного массива в непосредственной близости от магматического очага вулкана Эльбрус . . . . .	22
Деев Е.В. Сильные палеоземлетрясения и голоценовое разломообразование на юго-востоке Горного Алтая – следствие продолжающегося сокращения земной коры в Центральной Азии . . . . .	24
Киряева Т.А., Сибиряков Б.П., Карстен В.В., Сибиряков Е.Б. Дискретность сейсмических событий и аномально низкие скорости волновых процессов . . . . .	26
Козлова И.А., Юрков А.К., Бирюлин С.В. Применение вариаций объемной активности почвенного радона при изучении геодинамических процессов . . . . .	29

Комзелева В.П., Медведь И.В., Кулаков И.Ю., Ступина Т.А. Структура верхней коры под вулканом Эбеко (о. Парамушир) по результатам сейсмической томографии. . . . .	33
Малышкин Т.Е. Разработка метода применения технологии оперативного спутникового мониторинга земли с целью сейсмического районирования территорий . . . . .	35
Маневич А.И., Морозов В.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральных зон сильных коровых землетрясений Тангшань 27.07.1976 и Акетао 25.11.2016 (Китай) . . . . .	36
Маринин А.В. Результаты полевых тектонофизических исследования в области Чуйской и Курайской впадин (Горный Алтай) . . . . .	38
Мартышко П.С., Бызов Д.Д. Плотностная модель земной коры Среднего Урала . . . . .	42
Медведь И.В., Полат Г. Останцы тетиса под границей Аравийско-Анатолийской плит на основе метода сейсмической томографии . . . . .	46
Мельник Е.А., Суворов В.Д., Павлов Е.В. Разномасштабные сейсмические неоднородности земной коры Сибирского кратона, его восточной и южной краин . . . . .	48
Назаров Л.А., Назарова Л.А., Голиков Н.А., Скулкин А.А. Валидация пороупругой модели трещиновато-пористых геоматериалов по данным лабораторных экспериментов . . . . .	51
Остапчук А.А. Оценка сейсмогенного потенциала тектонического разлома. . . . .	55
Пантелеев И.А., Барях А.А. Особенности изменения порово-трещинного пространства красного сильвинита при ступенчатом одноосном сжатии по данным рентгеновской микротомографии. . . . .	57
Пантелеев И.А., Lyakhovsky V., Shalev E. Ориентационная природа пороупругой реакции флюидонасыщенного коллектора на прохождении сейсмических волн: теория и верификация . . . . .	60
Першин С.М., Собисевич А.Л., Гравиров В.В., Гришин М.Я., Лиходеев Д.В., Мясников А.В. Эволюция сигналов вариаций аэрозолей, температуры скальных пород и деформации коры в дальней штольне Баксанской нейтринной обсерватории во время сильных землетрясений в Турции 06.02.2023 г. . . . .	62
Ребецкий Ю.Л., Тверитинова Т.Ю. Тектонофизика о формировании напряженного состояния в литосфере орогенов зон субдукции тихоокеанского типа. . . . .	64
Ребецкий Ю.Л. Новый максимальный принцип в решении обратной задачи тектонофизики . . . . .	68

Сибиряков Е.Б.	
Отражение от жёсткой криволинейной границы . . . . .	72
Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А.	
Необратимая деформация и остаточные напряжения при циклическом нагрузении горных пород с дефектами . . . . .	76
Стефанов Ю.П., Татаурова А.А., Бакеев Р.А.	
Оценки формирования зон необратимой деформации и полос локализованного сдвига верхней части земной коры в условиях сжатия и сдвига . . . . .	77
Стрельников А.А.	
Параметризация палео и исторических землетрясений Северного Тянь-Шаня	78
Суворов В.Д., Мельник Е.А., Павлов Е.В.	
Региональные сейсмо-гравитационные неоднородности верхней мантии Западно-Сибирской плиты и сопредельных областей Урала и Алтае-Саянской складчатой области (профиль кварц) . . . . .	80
Татаурова А.А., Стефанов Ю.П.	
Изучение формирования надвиговых структур с применением геомеханического подхода . . . . .	84
Турунтаев С.Б., Зенченко Е.В., Зенченко П.Е., Начев В.Ю., Чумаков Т.А.	
Взаимодействие трещин гидроразрыва с существующими трещинами. . . . .	86

Научное издание

**ГЕОДИНАМИКА.  
ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА**

**Материалы двадцатой Всероссийской научной конференции  
«Геодинамика. Геомеханика и геофизика»  
18–26 июля 2024 г.  
Новосибирск – Горный Алтай, Россия**

Минимальные системные требования:  
Тип компьютера, процессор, сопроцессор Pentium 4  
Оперативная память (RAM) Мб  
Необходимо на винчестере 10 Гб  
Операционные системы Windows XP  
Дополнительные программные средства Adobe Acrobat 7.0

Сибирское отделение РАН  
630090, просп. Акад. Лаврентьева, 17



ISBN 978-5-6050986-8-3



9 785605 098683 >