



Памяти
Н. И. Павленковой

СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИКА. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ.

ДЕВЯТАЯ МОЛОДЕЖНАЯ
ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ
ШКОЛА-СЕМИНАР В ИФЗ РАН

Материалы докладов Всероссийской
конференции с международным
участием, 20-24 октября 2025 г

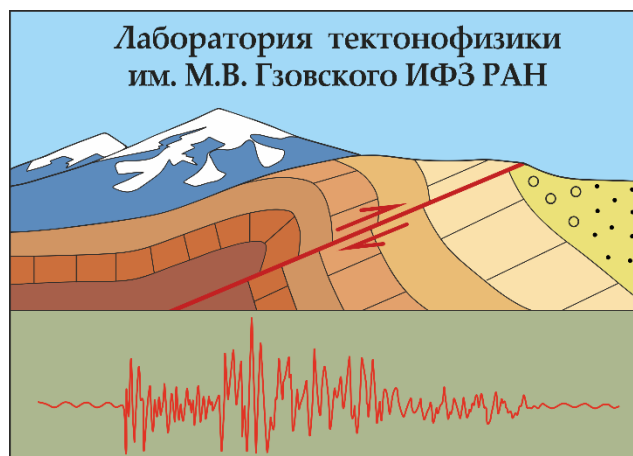
ЛЕКЦИИ И
ДОКЛАДЫ



**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ОТДЕЛЕНИЕ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ ТЕКТОНИКИ И ГЕОДИНАМИКИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ ИМ. О.Ю. ШМИДТА РАН**



**ЛАБОРАТОРИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ
ТЕКТОНОФИЗИКИ ИФЗ РАН**



**СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИКА.
МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

Материалы докладов Девятой Всероссийской молодежной тектонофизической школы-семинара, 20-24 октября 2025 г.

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

Москва
2025

УДК 551.2.3
ББК 26.324

Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы докладов Девятой Всероссийской молодежной тектонофизической школы-семинара. – М.: ИФЗ РАН. 2025. – 166 с.

ISBN 978-5-9166820-77-5

В сборнике публикуются лекции и материалы докладов, сделанные на Девятой Всероссийской молодежной тектонофизической школе-семинаре «СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИКА. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ». Конференция традиционно проходила в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН с 20 по 24 октября 2025 г и была посвящена памяти Нинели Ивановны Павленковой (1929–2025) – выдающегося советского и российского ученого-геофизика. В сборник включены биографический очерк о Н.И. Павленковой и воспоминания её коллег по совместной работе.

В материалах Девятой Всероссийской молодежной тектонофизической школы-семинара рассматривается широкий круг научных проблем, связанных с изучением напряженно-деформированного состояния земной коры, а также её строения и геодинамики. В лекциях и докладах представлены практические аспекты применения тектонофизических методов и подходов при поисках и разработке месторождений полезных ископаемых. Часть докладов посвящена совместному использованию геофизических и тектонофизических методов при изучении разных регионов, численному моделированию и лабораторным экспериментам.

В приложение размещена Программа докладов Девятой Всероссийской молодежной тектонофизической школы-семинара «СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИКА. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ».

Ответственные редакторы:

д. физ.-мат. н. Ю.Л. Ребецкий
к. геол.-мин. н. А.В. Маринин

Редакторы:

к. геол.-мин. н. Е.А. Мануилова
И.В. Бондарь

В оформлении обложки использована фотография Н.И. Павленковой

ISBN: 978-59166820775



© ИФЗ РАН, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ПАМЯТИ ПАВЛЕНКОВОЙ НИНЕЛЬ ИВАНОВНЫ (1929 – 2025).....	8
Сотрудничество Н.И. Павленковой с Центром ГЕОН как развитие метода глубинных сейсмических исследований	26
ЧАСТЬ I. ЛЕКЦИИ	28
<i>Леонов М. Г.</i> Фрагментированность (делимость) земной коры: структурно-тектонический аспект (в развитие идей академика М.В. Садовского).....	28
<i>Ребецкий Ю. Л.</i> Месторождения благородных металлов и роль тектонических напряжений	35
ЧАСТЬ II. МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ	43
<i>Артемов О. А., Соколов С. Ю.</i> Связь неотектонических деформаций разломной зоны Чарли Гиббс на поверхности дна с глубинными мантийными неоднородностями	43
<i>Боголюбский В. А., Соколов С. Ю., Харченко С. В.</i> Структурные стили фундамента Северной Атлантики по данным спектральных характеристик гравитационного поля.....	48
<i>Боголюбский В. А.</i> Структурообразование в районах взаимодействия спрединговых хребтов и внеосевых мантийных плюмов	53
<i>Бондарь И. В.</i> Обзор тектонофизических исследований Крымского региона.....	58
<i>Гайдаленок О. В., Сысолин А. И., Пулинец С. А., Сеспед А., Тосо С., Браво М.</i> К созданию мультidisциплинарной платформы прогноза землетрясений	63
<i>Гордеев Н. А.</i> Аэротектонофизика, опыт картирования трещиноватости.....	69
<i>Гордеев Н. А., Батов А. В., Гудкова Т. В.</i> Применение SimSGM для реконструкции полей напряжений в районе Cerberus Fossae на Марсе	72
<i>Гордеев Н. А., Кузнецов М. А., Дунаев Н. Н.</i> Напряженно-деформированное состояние массивов пород острова Южная Георгия (Антарктика).....	74
<i>Докучаева А. И., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А., Макеева Т. Г.</i> Численное моделирование активизации разлома вблизи выработанного пространства рудника.....	77
<i>Досайбекова С. К., Досымбекова Ж. Б., Жунусова Ж. К., Амиров Н. Б.</i> Изучение механизм очагов землетрясений в регионе Заилийского Алатау на основе данных за 2000–2024 гг.	80
<i>Индаков Г. С., Казначеев П. А., Майбук З.-Ю. Я., Пономарев А. В., Матвеев М. А., Морозов Ю. А., Подымова Н. Б.</i> Кластеризация импульсов акустической эмиссии в экспериментах по нагреву образцов горных пород	84
<i>Казначеев П. А., Краюшкин Д. В., Майбук З.-Ю. Я., Пономарев А. В., Патонин А. В., Закржевская Н. А., Мигунов И. Н., Кох В. В.</i> Некоторые результаты исследования смещений на лабораторной модели разлома	89
<i>Королева А. О.</i> Инструментальные возможности георадара ОКО-3 АБ-100МЗ для исследования структурных деформаций четвертичных и коренных отложений (на примере северного побережья Онежского озера).....	93
<i>Крикун Н. С., Гордеев Н. А., Ушаков Д. Е., Бабенко И. А., Таловина И. В.</i> Изучение тектонических деформаций, морфологии и кинематики разломов оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида) по Результатам 70-й РАЭ.....	98
<i>Крылов А. А.</i> Основные эндогенные геопасности в российском секторе Северного Ледовитого океана	103

<i>Кулешов Д. А.</i> Определение параметров вековой вариации геомагнитного поля при проведении геомагнитных наблюдений на Байкальском и Алтайском геодинамических полигонах за 1997-2025 гг.	106
<i>Куприн Д. Ю., Дубиня Н. В.</i> Статистическая обработка результатов автоматической интерпретации микроимиджеров	109
<i>Мануилова Е. А., Тверитинова Т.Ю.</i> Тектонические напряжения северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны. Результаты, полученные в ходе экспедиции РГО по маршруту Байкало-Амурской магистрали	113
<i>Мануилова Е. А.</i> Взаимосвязь флювиальных форм рельефа и современных тектонических структур Таманского полуострова.....	118
<i>Мягков Д. С.</i> Моделирование нагружения земной коры в области развития магматических тел различных типов. Напряжённо-деформированное состояние коры Кольского региона.....	123
<i>Мягков Д. С.</i> Моделирование нагружения земной коры в области развития магматических тел различных типов. Напряжённо-деформированное состояние коры Центрально-Азиатского складчатого пояса.....	127
<i>Мягков Д. С.</i> Моделирование затухания поля напряжений в области развития локализованного сдвига	131
<i>Новиков М. А., Крылов А. А.</i> Уточнение сейсмического режима в районе дельты р. Лены для оценки сейсмической опасности.....	135
<i>Нугманов И. И., Остапчук А. А., Стахеев Е. А.</i> Кластеризация участков коры, опасных для сильнейших землетрясений.....	140
<i>Пашичев Б. Н., Малинникова О. Н., Ульянова Е. В.</i> Структурный фактор при прогнозе опасности внезапных выбросов угля и газа	144
<i>Сенцов А. А., Агibalов А. О.</i> Применение морфометрических и тектонофизических методов для задач сейсмотектоники.....	148
<i>Силевич А. С.</i> Линеаментный анализ по цифровой модели рельефа для выявления природных каналов миграции метана.....	150
<i>Таран Я. В., Алёшин И. М., Холодков К. И., Передерин Ф. В.</i> Геофизические исследования Раахе-Ладожской зоны в Северном Приладожье.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Программа Девятой Всероссийской молодежной тектонофизической школы-семинара «Современная тектонофизика. Методы и результаты»	158

ПРЕДИСЛОВИЕ

История проведения тектонофизических конференций в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН) начинается с 1957 года. В этот год в ИФЗ РАН (тогда Геофизический институт АН СССР) под руководством В.В. Белоусова и М.В. Гзовского прошло Первое Всесоюзное тектонофизическое совещание. Основным координатором совещания являлась тектонофизическая группа под руководством М.В. Гзовского, находившаяся тогда в отделе геодинамики Геофизического института АН СССР, которая в 1968 году была преобразована в лабораторию тектонофизики. По ряду причин в ИФЗ РАН после первого тектонофизического совещания долгие годы тектонофизические конференции не проводились. В связи с юбилеем лаборатории тектонофизики в 2008 году была проведена Всероссийская конференция «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле». С этого момента сотрудники лаборатории продолжают заложённые нашими великими учителями традиции и проводят конференцию раз в четыре года.

Для молодых ученых, аспирантов и студентов в период между конференциями проводятся молодежные тектонофизические школы-семинары раз в два года, начиная с 2009 г. К настоящему времени прошло уже восемь молодежных школ-семинаров, нынешняя – девятая по счету.

Основной целью проведения молодежных школ-семинаров является ознакомление молодых ученых, использующих в своих исследованиях тектонофизические методы, с наиболее важными представлениями современной тектонофизики и с новыми данными, полученными в сопредельных научных направлениях. Работа на конференции включает два блока. Первый – чтение лекций-докладов приглашенными ведущими учеными РФ по тектонофизике и близких по тематике исследований. Второй – доклады молодых ученых.

В 2025 году с 20 по 24 октября в ИФЗ РАН проходила **Девятая Всероссийская молодежная тектонофизическая школа-семинар «СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИКА. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ»**. Мероприятие проводилось в очном и дистанционном формате (сервер jitsi.ifz.ru). Всего на конференцию было подано 69 заявок. В итоге были прочитаны 9 лекций ведущими учеными РФ по тектонофизике и близких по тематике исследований, заслушано 35 очных докладов от молодых исследователей, 10 – в режиме онлайн. В работе конференции приняли участие ученые из различных городов России и ближнего зарубежья: Москвы, Новосибирска, Алма-Аты (Казахстан), Южно-Сахалинска, Иннополиса, Краснодара, Перми и Санкт-Петербурга.

Открыл мероприятие сопредседатель оргкомитета школы-семинара главный научный сотрудник ИФЗ РАН, д.физ.-мат.н. Ю.Л. Ребецкий (фото 1, а). С приветственным словом выступил заместитель председателя оргкомитета, зав. лаб., ведущий научный сотрудник ИФЗ РАН, к. геол.-мин. н. А.В. Маринин (фото 1, б).



Фото 1. Открытие Девятой Всероссийской молодежной тектонофизической школы-семинара «СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИКА. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ»: (а) – д.физ.-мат.н. Ю.Л. Ребецкий; (б) – к. геол.-мин. н. А.В. Маринин

Основными научными темами Девятой молодежной тектонофизической школы-семинара являлись:

1) **Изучение напряженно-деформированного состояния земной коры:** методы тектонофизических исследований природных напряжений и деформаций; результаты методов измерения напряжений in-situ, генезис тектонических напряжений.

2) **Сейсмические и геологические опасности:** методы тектонофизики в решении проблем очага землетрясения и прогноза сейсмической опасности; разлом, как геологическое и физическое тело; взаимосвязь вулканизма и сейсмического процесса.

3) **Тектонофизическое аналоговое и численное моделирование:** модели из эквивалентного материала, механизмы складкообразования и горообразования; зоны сдвига; взаимодействие тектонических процессов и эрозии.

4) **Тектонофизика и полезные ископаемые:** тектонофизика в решении проблем поиска и разработки месторождений полезных ископаемых; сдвиговая тектоника; природно-техногенное напряженно-деформированное состояние недр в районах месторождений.

5) **Океаны, Арктика, Антарктика:** неотектонические деформации разломных зон, глубинные мантийные неоднородности, зона спрединга, зона субдукции.

6) **Геофизические методы исследования:** строение литосферы, тектоника, структурные деформации четвертичных и древних отложений.

Работа конференции была организована по вышеперечисленным секциям, которые проходили последовательно в конференц-зале ИФЗ РАН, что позволило всем активным и добросовестным участникам прослушать все лекции и доклады. Программа Девятой молодежной тектонофизической школы-семинара представлена в Приложении 1.

21 октября были заслушаны доклады молодых ученых в основном из ИФЗ РАН по направлению «*Изучение напряженно-деформированного состояния земной коры*». В рамках этой тематики во второй половине дня состоялись лекции А.В. Маринина Тектонические аспекты развития Большого Кавказа (ИФЗ РАН), а также В.Г. Трифонова, Д.М. Бачманова Соотношение активных разломов и офиолитов в Альпийско-Гималайском поясе (ГИН РАН).

22 октября началось с докладов молодых ученых из секции «*Океаны, Арктика, Антарктика*». Это представители из ГИН РАН и Института океанологии РАН. После прозвучали доклады, посвященные вопросам «*Тектонофизического аналогового и численного моделирования*». В начале второй половины дня проведено ознакомление участников конференции с лабораторной экспериментальной установкой по моделированию смещений блоков горных пород (эксперименты на слайдер-модели), которую провел к.т.н., внс лаборатории физики землетрясений и неустойчивости горных пород П.А. Казначеев. После Ю.П. Стефанов прочитал лекцию на тему Численное моделирование процессов деформации и разрушения в геосреде (ИНГГ СО РАН).

23 октября в первой половине дня состоялась секция «*Геофизические методы исследования*». Открыли эту секцию лекции А.В. Горбатилова с соавторами А.А. Цуканов, М.Ю. Степанова, Н.В. Андреева, Н.Г. Кошевой, Ю.В. Харазова Практика применения метода микросейсмического зондирования в задачах тектоники и геологоразведки (ИФЗ РАН) и А.Г. Гоева, К.А. Докукиной Строение литосферы и древняя тектоника Кольского региона по новым сейсмологическим данным (ИФЗ РАН, ИДГ РАН). Во второй половине дня прослушаны лекции и доклады из секции «*Тектонофизика и полезные ископаемые*». В этой секции было прочитано три лекции – Г.Н. Гогоненковым Сдвиговая тектоника и нефтегазовые месторождения Западной Сибири (ВНИГНИ), Ю.Л. Ребецким Особенности эволюции развития субдукционных зон, как фактор формирования рудных месторождений гидротермального генезиса (ИФЗ РАН) и Н.В. Дубиней Изучение напряженного состояния верхних слоев Земной коры для решения прикладных задач освоения и разработки нефтегазовых месторождений (ИФЗ РАН).

24 октября – заключительный день конференции был посвящен докладам на тему «*Сейсмические и геологические опасности*». Здесь представлено большое количество докладов молодых исследователей из ИФЗ РАН, Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, ТОО Национального научного центра сейсмологических наблюдений и исследований (Казахстан), Института проблем комплексного освоения недр РАН, Института океанологии РАН, Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Университета Иннополис, ООО НИИ Кубаньгеология.

В ходе вечернего заседания была прочитана лекция М.Г. Леоновым Фрагментированность земной коры: формы, размерность, структурно-вещественное выражение (в развитие идей академика М.В. Садовского) (ГИН РАН). По окончании всех докладов состоялось завершение Девятой Всероссийской молодежной тектонофизической школы-семинара небольшой дискуссией по основным научным темам конференции.

Хочется отметить, что после завершения Первого Всесоюзного тектонофизического совещания в 1957 году, по материалам докладов был подготовлен и издан тектонофизический сборник Проблемы тектонофизики. В настоящее время традиция выпуска итогового сборника сохранилась, и, по результатам проведения молодежных тектонофизических школ-семинаров, выходят материалы

«Современная тектонофизика. Методы и результаты» (фото 3а). К настоящему времени уже вышло восемь сборников, этот девятый по счету. В ходе проведения настоящей конференции на выставке научных работ, подготовленной сотрудником библиотеки ИФЗ РАН И.П. Плаховой, была представлена эта коллекция сборников, а также книги и журналы с фундаментальными исследованиями, опубликованными сотрудниками лаборатории тектонофизики (фото 3б).



Фото 3. (а) – Обложка сборника Восьмой молодежной тектонофизической школы-семинара, 2023 г.; (б) – Коллекция книг, сборников и журналов с работами сотрудников лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН

Традицией каждой молодежной тектонофизической школы-семинара является ее посвящение ученому, который внес весомый вклад в развитие тектонофизики. В этом году Девятая молодежная тектонофизическая школа-семинар посвящается памяти Нинели Ивановны Павленковой (1929 – 2025 гг.) – выдающегося советского и российского геофизика (фото 4). С 1973 года Павленкова Н.И. трудилась в Институте физики Земли. После изменений в структуре института с 2014 года Нинель Ивановна работала в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН.



Фото 4. Фотография Н.И. Павленковой на молодежной школе-семинаре

В знак уважения и памяти о нашей коллеге в этом сборнике мы приводим биографический очерк о Н.И. Павленковой, составленный ее дочерью Галиной Александровной, также работавшей в институте и лаборатории. В сборник включены воспоминания С.Л. Костюченко (ОО Росгео) и В.А. Ракитова (Центр ГЕОН) о сотрудничестве Н.И. Павленковой с Центром ГЕОН в рамках развития метода глубинных сейсмических исследований.

Проводимые в ИФЗ РАН молодежные тектонофизические школы-семинары имеют своей задачей не только обсуждение современных достижений тектонофизики, но и привлечение интереса к ее методам молодых исследователей. Мы надеемся, что проведенная в этом году Девятая молодежная тектонофизическая школа-семинар «Современная тектонофизика. Методы и результаты» не стала исключением и придала новый импульс интереса к этой науке.

ПАМЯТИ ПАВЛЕНКОВОЙ НИНЕЛЬ ИВАНОВНЫ (1929 – 2025)

Павленкова Н.И. (дев.фам. Юхновец) родилась в 1929 году в Смоленске в семье молодых коммунистов – командира Красной Армии и учительницы русского языка и литературы. И имя ей дали Нинель в духе того времени и убеждений (т.е. Ленин при чтении в обратном порядке).

Когда началась война, отец был с первого дня на фронте, а мама, будучи членом партии и директором школы, не могла оставить школу и эвакуироваться без разрешения райкома и при приближении фронта организовала оставшихся учеников, включая своих детей, для дежурства на крыше зданий и сбрасывания зажигательных снарядов. Когда, наконец, было получено разрешение на эвакуацию, фронт был совсем близко, приходилось бежать под бомбёжками, сгорела большая часть вещей и документов. Направили их в Среднюю Азию. Там было много эвакуированных, не было жилья и нечего было есть, несмотря на то что мать всё время работала. Нинель заразилась малярией и из-за голода была на грани смерти. Тогда её мать добилась разрешения на переезд к сестре в Новосибирск, где было легче с едой и это дало им возможность выжить.

Войну её отец закончил в Берлине, но его оставили служить комендантом в пригороде Берлина. Его здоровье было сильно подорвано, и семья выехала к нему в Германию. Поэтому 10-й класс Нинель закончила в Потсдаме, и в этом же году семья отправилась в Москву для прохождения лечения отца и поступления Нинель в МГУ. В то время самой престижной специальностью была ядерная физика, и мечтой Нинель было поступить на физфак по этой специальности, но уже при подаче документов её предупредили, что поступление девушек на эту специальность не приветствуется. Так или иначе по результатам экзаменов её не приняли на физфак, но предложили поступить на новую перспективную специальность геологического факультета – геофизику. Она согласилась и в дальнейшем ни дня не пожалела об этом. В то время на геологический факультет МГУ был приглашен крупный учёный В.В. Федьинский, имевший большой научный и производственный опыт. Им была создана кафедра геофизических методов исследования земной коры, разработаны курсы «Гравитационная разведка» и «Теория гравитационного потенциала», а также написан учебник для вузов – «Разведочная геофизика», который и сегодня является одним из лучших учебников для геофизиков-разведчиков.



Фото 1. (а) – Нинель – студентка МГУ; (б) – Студенты МГУ, обед на практике. Слева направо: Павленкова Нинель, Фремд В.М., Зверев С.М., Печерский Д.М. – будущие доктора наук ИФЗ РАН

В это время на основе двух экспериментальных наук – структурной сейсмологии, изучающей строение Земли по записям землетрясений, и сейсморазведки, использующей искусственные источники для исследований верхней части земной коры (до глубин в 5-10 км), начал формироваться метод глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), на базе которого, в дальнейшем строились все научные исследования Н.И. Павленковой.



Фото 2. Федьинский В.В., Гамбургцев Г.А., Ризниченко Ю.В., Белоусов В.В. – великие Учителя, встреча с которыми, оказала решающее влияние на направления деятельности Нинель Ивановны

Создание метода ГСЗ связано в нашей стране с первыми работами Института теоретической геофизики АН СССР (ныне Институт физики Земли РАН) и с именем Григория Александровича Гамбургцева. Первые попытки при помощи взрывов проникнуть на большие глубины были предприняты им еще в 1939 году [Гамбургцев, 1960]. Тогда под Серпуховом был произведен большой взрыв, и в 30 км от него многоканальной сейсморазведочной станцией была получена запись длиной в 1 минуту с четкими регулярными волнами. Но этот эксперимент, основанный на регистрации близвертикальных глубинных отражений, был признан тогда неудачным, так как среди зарегистрированных волн невозможно было отделить однократные глубинные отражения от многократных, сформировавшихся в осадочном чехле. Было решено перейти на регистрацию преломленных волн на удалениях до 300–400 км. Но война отодвинула эти исследования почти на десятилетие.

Лишь в 1947 году Г.А. Гамбургцев смог вновь вернуться к опытным работам по глубинному зондированию. Тогда Институтом физики Земли была успешно осуществлена регистрация взрыва отечественными станциями на удалении в 350 км (взрыв проводился в Черном море). В результате уже в 1949 году был выполнен первый в мире проект по глубинным сейсмическим исследованиям земной коры на профиле Иссык-Куль-Балхаш. Это было кусочно-непрерывное профилирование с многоканальными станциями и с системой встречных годографов. Взрывы производились в озерах Иссык-Куль и Балхаш. К этим работам активно привлекались студенты МГУ на практике, среди которых была Нинель. С первого же опыта знакомства с записями сейсмических волн и с методом Гамбургцева, она поняла, что это то, чем она хочет заниматься дальше, хотя её специализацией в МГУ была гравиметрия. Это было время бурного развития геофизической науки, разрабатывалась новая аппаратура, программы разведки полезных ископаемых во многих регионах СССР и особенно в Сибири.

Причём в Западной Европе первые опыты по регистрации взрывов сейсмологическими станциями были тоже проведены в 1947- 48 годах (взрывы Helgoland и Haslack). Но систематические исследования по профилям, сначала с использованием только карьерных взрывов, были начаты лишь в 1957 году [Giese et al, 1976].

Послевоенные студенты были совершенно особенным поколением. По воспоминаниям Н.И. Павленковой несмотря на то, что умер отец, не было жилья (она с матерью жила в общежитии в подвале), не хватало еды и ей просто приходилось учиться на отлично, чтобы получать повышенную стипендию, при этом настроение было совершенно оптимистичное, такого энтузиазма она никогда больше не наблюдала. Страна возрождалась, планы были грандиозные, студенты жадно учились всему новому. Помимо занятий в МГУ, Нинель занималась в секциях гимнастики, фигурного катания, фотографии, играла на аккордеоне, ходила в театральные кружок, а каждый свободный вечер ходила в Большой театр.

По окончании МГУ в 1951 г. Федьинский В.В. предложил ей поступить к нему в аспирантуру. Но в Бюро комсомола ей не дали необходимой характеристики-рекомендации из-за того, что она переписывалась с американцем. Поэтому её направили на работу в Западную Сибирь, где в то время были развернуты широкомасштабные разведочные и поисковые работы на нефть и газ. Вначале геофизические работы велись на юге Сибири вдоль железнодорожных магистралей в Минусинской и Кузнецкой впадинах, а затем перебазировались на север Западной и Восточной Сибири, в Якутию в суровые условия безлюдья и бездорожья, жесткого климата. А в 1959 г. правительством было принято решение о необходимости «дальнейшего усовершенствования региональных исследований глубинного геологического строения земной коры геофизическими методами, в том числе в

заболоченных и таёжных районах Сибири». Масштаб разведочных работ был огромным, число дипломированных специалистов можно было пересчитать по пальцам. Обработка данных велась вручную, в лучшем случае на арифмометре. Нинель вспоминала, что произвела фурор, явившись в камералку с логарифмической линейкой и посчитав за один день то, что вся камералка считала неделями вручную. Помимо своих должностных обязанностей, ей пришлось научиться ходить в длительные походы, у неё была своя система как одеться, как пить воду, чтобы надолго хватило, как вымыться одним чайником воды, как поставить за несколько минут палатку, разжечь костёр под дождём, она водила грузовики (не имея прав), ездила верхом на лошади, метко стреляла из ружья и даже могла спуститься на парашюте. В полевых партиях рабочими трудились в основном ээки. Это была суровая школа жизни, и пройти её помогало не менее трудное военное детство. Позже Федынский В.В. говорил: «Геофизики, которые проложили путь разведчикам нефти в Сибири, достойны того, чтобы их подвиг, совершенный в 1950-1960 годы был специально изучен и описан, так как он сродни тем трудовым подвигам, которые наша славная молодежь творила в Комсомольске-на-Амуре, на целине в Казахстане и на стройках гидроэлектростанций в той же Сибири».



Фото 3. Работа в Сибири в полевой партии

Там Н.И. Павленкова проработала почти 10 лет, принимая участие в гравиметрических и сейсмических геологоразведочных работах сначала в полевых партиях, а в последующие годы уже в камеральных. В это же время закончила заочную аспирантуру при Московском институте прикладной геофизики и в 1961 г. защитила на геологическом факультете МГУ диссертацию на тему «Строение Среднего Приобья». В Сибири Нинель Ивановна вышла замуж за геофизика Павленкова А.И. и родила двух дочерей. Старшая тоже работала в ИФЗ, но трагически погибла в 33 года, другая стала в дальнейшем её ближайшим помощником и сотрудником последние 40 лет.

После годовой командировки в ГДР в 1962 г, где наши специалисты помогали создавать сейсморазведочную службу, она переехала на постоянную работу в Киев, в Институт геофизики АН УССР. С этого рубежа началась её академическая научная деятельность в области глубинных сейсмических исследований. В это время киевский институт начал крупные работы ГСЗ, были выполнены детальные наблюдения с многоканальными станциями по нескольким протяженным профилям ГСЗ, пересекающим Украинский щит, Днепровско-Донецкую впадину, Крым, Карпаты. Нинель Ивановна участвовала в полевых работах и возглавляла камеральную группу по обработке этих материалов. В это время она разработала методику интерпретации волновых полей на основе комплексного анализа записей, преломленных и закритических отраженных волн для дальнейшего применения лучевого моделирования. В дальнейшем этот материал явился основой её докторской диссертации, которую она защитила в Институте физики Земли (ИФЗ РАН) в 1974 г. и монографии «Волновые поля и модели земной коры» (континентального типа), которая стала настольной книгой сейсмологов того времени.

Её научная деятельность была тесно связана с бурным развитием ГСЗ, связанным в основном с появлением компьютерной техники, разработкой программ обработки первичного материала. Методические основы ГСЗ были заложены в СССР школой Г.А. Гамбурцева (Ю.В. Ризниченко, И.П. Косминская, Е.И. Гальперин, И.С. Берзон, А.М. Епинатьева и др.). Начиналось всё с корреляционного метода преломленных волн (КМПВ), разработанного этой же группой исследователей и широко использовавшегося в те годы для изучения осадочного чехла и поверхности фундамента [Гамбурцев и др., 1952]. КМПВ базировался на кинематике головных волн, для них были

разработаны системы наблюдений и многоканальные низкочастотные сейсмические станции, которые позволяли непрерывно проследивать по профилю целевые преломляющие горизонты.

Успехи первых работ ГСЗ привели в 50-60-е годы к широкому использованию этого метода Министерством Геологии СССР. Наиболее важной задачей ГСЗ для Министерства было проследивание поверхности фундамента в глубоких осадочных бассейнах, перспективных на нефть и газ. Было показано, что в платформенных впадинах глубина до фундамента может достигать 15-20 км (Прикаспийская впадина). Такие глубины не были доступны обычной сейсморазведке, и нефтяники стали проводить ГСЗ практически во всех регионах страны. Именно с работами этого министерства связано развитие наиболее детального варианта ГСЗ, непрерывного профилирования: многоканальные разведочные станции передвигались по профилю с расстоянием между приборами в 100-200 м и регистрацией одновременно от 3-4 до 7-8 пунктов взрыва. Были получены записи до удалений в 300-400 км с четкими первыми вступлениями и множеством волн в последующей части записи. География этих работ постоянно расширялась. Ими были охвачены Средняя Азия, Кавказ, Восточно-Европейская платформа. В эти работы включались все новые геофизические организации, формировались целые школы: ленинградская (И.В. Литвиненко, С.А. Анкудинов, Л.Н. Платоненкова и др.), украинская (Ю.Б. Демиденко, В.Б. Соллогуб, А.В. Чекунов, Н.И. Павленкова, Т.В. Ильченко и др.), уральская (В.С. Дружинин, Н.И. Халевин, С.Н. Кашубин и др.), алма-атинская (А.Н. Антоненко, И.К. Пушкарев, Б.А. Хрычев, В.И. Шапилов и др.). В целом, в конце 60-х годов было отработано несколько тысяч километров профилей по детальной системе наблюдений. Это было, несомненно, время бурного развития отечественного ГСЗ, когда подобных работ не было еще в других странах.

В результате этих исследований были установлены основные закономерности и связи глубинного и приповерхностного строения для многих ключевых регионов. Под всеми горными сооружениями, включая древние (Урал), было выявлено утолщение земной коры ("корни гор"). Была установлена большая толщина коры под древними платформами и высокие средние скорости в ней. Уже тогда были выявлены основные характеристики разных типов коры и введены такие понятия, как континентальная кора, океаническая, субконтинентальная и субокеаническая кора. Много нового было получено о внутреннем строении коры различных тектонических структур. Но было и много трудностей.

КМПВ был совершенный, разработанный до деталей метод для головных волн. В нем подробно рассматривались и общие вопросы сейсмического метода: принципы фазовой корреляции волн, использование для этого формы их записи, основы анализа волновых полей, определение природы волн. Такие понятия как непараллельность нагоняющих годографов, разностные и сводные годографы, линии t_0 , формулы для расчётов глубин и скоростей по характерным точкам годографов и многое другое, введенные в те годы, остаются до сих пор фундаментальной основой ГСЗ для анализа волновой картины и определения интерпретационной модели среды. Однако метод головных волн не мог полностью удовлетворить потребности глубинных исследований.

Для решения двумерной обратной задачи был разработан метод полей времен [Ризниченко, 1946]. Это – классика сейсмического метода, его теоретическая основа. Многие годы в отсутствие компьютерных технологий он был главным методом построения сейсмических разрезов, а теперь является основой для множества алгоритмов решения прямых и обратных сейсмических задач. Нинель Ивановна вспоминала, что за рубежом этот метод в своем ручном варианте, когда поля времен строятся с помощью циркуля, был предложен двадцать лет спустя известным уже тогда немецким ГСЗ-ешником Р. Майснером. В 1968 году он приехал в Ленинград на Европейскую сейсмологическую комиссию, впервые проводившуюся в СССР, и выступил там со своим «новым» методом. Для советских сейсмиков, «крутивших» поля времен со студенческих лет, сначала это было шоком. Казалось невероятным, как можно было так долго жить без этого метода? Потом стало жалко Р. Майснера, который, конечно, самостоятельно придумал этот метод, гордился им и не понимал сдержанной реакции советских участников совещания.

Объяснение было простым. Глубинные сейсмические исследования за рубежом выросли из сейсмологии, основанной в то время на решении одномерных задач. И само ГСЗ вначале было основано на регистрации отдельных карьерных взрывов и построении одномерных моделей земной коры.

Другой важной разработкой школы Гамбурцева, к которой Нинель Ивановна относилась себя, была динамическая теория распространения сейсмических волн. Непрерывные системы наблюдений с встречными и нагоняющими годографами позволяли с большой точностью осуществить фазовую корреляцию сейсмических волн не только в первых, но и в последующих вступлениях и давали возможность исследовать не только кинематические, но и динамические особенности регистрируемых волн. Динамика волн позволяет определить такие важные особенности геологической среды, как поглощение, добротность и тем самым увеличить информативность

экспериментальных записей. Использование динамики сейсмических волн стало в ИФЗ одним из наиболее развиваемых направлений (Кун, Невский, Николаев).

Разработки в области динамики сейсмических волн оказались особенно важными для определения природы волн. Сначала ГСЗ назывался методом преломленных волн, и отличалось от КМПВ лишь глубиной исследований.

Большую роль в этих исследованиях сыграли работы другой крупной школы советских геофизиков – школы Г.И. Петрашеня. Они сыграли не только огромную роль в развитии теории распространения сейсмических волн [Петрашень и др., 1959] и в решении многих методических проблем ГСЗ, созданный ими лучевой метод является базовым советской сейсмологии [Алексеев, Гельчинский, 1959]. По своей значимости он может быть сопоставлен разве только с методом полей времен Ю.В. Ризниченко. Благодаря одному из учеников этой школы Червени [Cervený et al, 1977] лучевой метод получил дальнейшее развитие и стал классикой мировой сейсмологии.

На основе лучевого метода А.С. Алексеев в конце 50-х годов провел серию расчетов для реальных моделей сред. Эти расчеты показали ошибочность существовавших в то время представлений о физической природе сейсмических волн в земной коре и привели к пересмотру моделей строения земной коры и верхней мантии. За разработку лучевого метода А.С. Алексеев с коллегами в 1982 году удостоен Государственной премии СССР. В 1962 г. вышла первая работа А.С. Алексеева по обратным динамическим задачам сейсмологии [Алексеев, 1962]. Фактически в ней была изложена новая концепция математического моделирования в геофизике, где он описывает всю историю критики установившейся практики интерпретировать все волны как головные. Он опирается на амплитудные графики волн, которые имеют максимум в критической точке и говорят о том, что это – отраженные волны. Была доказана малая интенсивность головных волн и регистрация в первых вступлениях рефрагированных волн. Это требовало перехода от модели с однородными слоями к градиентным моделям.

В дальнейшем и другие работы школы Г.И. Петрашеня [Вопросы... 1957, 1958, 1959] подтвердили правильность положения, что на больших удалениях от источника доминирующими волнами являются закритические отраженные и рефрагированные волны.

Нинель Ивановна приняла активное участие в консультациях по созданию программного обеспечения для решения прямой задачи этим методом, в тестировании программы И. Пшенчика SEIS85 и внедрении её в нашей стране. Сама по себе возможность решения прямой сейсмической задачи для горизонтально-неоднородных сред открыла важный этап развития ГСЗ, появился механизм проверки правильности выполненных построений и механизм изучения законов распространения сейсмических волн в сложных средах. Методы решения прямой задачи постоянно развивались и в настоящее время они являются основными методами построения сейсмических моделей ГСЗ (метода математического моделирования). Они являются также основой для развития современных методов анализа волновых полей, их обработки и интерпретации [Павленкова, Пшенчик, 1982]

В это же время Н.И. Павленковой был предложен метод редуцированных годографов [Павленкова, 1973], который позволяет строить разрезы в изолиниях скоростей по системе встречных годографов рефрагированных волн и определять принадлежность отраженных волн к тем или иным скоростным уровням.

В какое-то время, особенно среди молодых специалистов, появились настроения, что роль интерпретатора волновых сейсмограмм будет сводиться к нулю и любой сможет ввести их как исходные данные и получить готовую модель среды. Н.И. Павленкова всегда отстаивала мнение, что ЭВМ никогда не заменит интерпретатора и писала, что: «Несмотря на развитие компьютерных технологий из всех этапов обработки данных ГСЗ самым важным остается совместный анализ встречных и нагоняющих волновых полей и годографов опорных волн и выбор на его основе интерпретационной модели. Этим отечественное ГСЗ до сих пор существенным образом отличается от зарубежного, где, к сожалению, такому анализу мало уделяется внимания. Чаще всего по каждому пункту взрыва строятся одномерные модели, из них komponуют стартовую модель для последующего двумерного моделирования. Это – опасный путь, так как в стартовую модель могут быть введены ложные детали, которые потом трудно устранить. Более того, для их компенсации во временном поле часто приходится вводить в разрез дополнительные усложнения» [Галкин, 1981].



Фото 4. Павленкова Н.И. со своей любимой киевской камералкой

Но параллельно с накоплением нового экспериментального материала и новых методов назревал т.н. «кризис ГСЗ». Уже в начале 60-х годов было показано многообразие регистрируемых волновых полей ГСЗ и их типовые особенности. Главным выводом этих исследований, приведшим к существенному изменению методических основ ГСЗ, было то, что волны, формирующиеся в земной коре, по своим динамическим, а иногда и кинематическим характеристикам не всегда соответствуют понятию головных волн, большая их часть является рефрагированными или отраженными.

На примере большого экспериментального материала также было показано, что в земной коре лишь поверхность фундамента и граница М создают волны, близкие по своим кинематическим параметрам к головным. В консолидированной же коре практически нет протяжённых сейсмических границ с резким скачком скорости, волны от которых можно было бы уверенно разделить на отдельные ветви головных волн. Но внедрение этих новых подходов в практику ГСЗ происходило очень медленно. Отказаться от привычных, ставших уже классическими, приёмов построения разрезов на основе метода головных волн, тем более отказаться от всех уже построенных разрезов, было не просто. Дискуссия о природе волн, и, как всегда бывает в России, дискуссия жаркая и непримиримая, продолжалась. Была показана возможность образования головных волн на тонких слоях с повышенной скоростью как интерференционных волн, образовавшихся наложением однократных и многократных отражений внутри слоя.

В плане этой дискуссии было проведено и моделирование на твёрдо-жидких и твёрдых моделях, которое показало, что в тонком слое действительно образуются интенсивные головные волны. Но в твёрдых моделях они очень быстро затухают и наиболее интенсивными являются отражённые волны. По данным вертикального сейсмического профилирования (ВСП) преломлённые волны также оказались гораздо слабее отражённых. На многих примерах было показано, что даже первые вступления из-за малой интенсивности преломлённых волн могут формироваться отражёнными волнами.

Таким образом, детально, с применением различных подходов, с теоретической и экспериментальной точек зрения, обсуждались в 60-е годы вопросы природы волн и физика их распространения [Косминская и др., 1972]. Это не было чисто теоретической дискуссией. От того, какая природа волн предполагалась интерпретатором, существенным образом зависели результаты ГСЗ, их разрезы. Если первые и последующие вступления интерпретировались как головные волны, разрез представлялся в виде серии протяжённых сейсмических границ с переменными граничными скоростями, но с постоянными пластовыми скоростями, равными граничным. Если первые вступления интерпретировались как рефрагированные волны, а последующие как отражённые, характер изменчивости скоростей изображался в виде изолиний скоростей, а сейсмические границы представлялись в виде отражающих площадок. Это приводило к разной геологической трактовке материалов ГСЗ. Исчезновение с разрезов протяжённых границ, каждой из которых было принято придавать определённый геологический смысл (граница между «гранитным» и «базальтовым» слоями, древние поверхности размывов, смены складчатости, «лунные» поверхности и т.д.), лишало материалы ГСЗ привычной привлекательности. Изолинии скорости и отдельные отражающие элементы, на которые часто распадалась даже граница М, казались некоторым исследователям непонятными или мало информативными. Все это воспринималось как признаки кризиса метода. Но по сути кризисная ситуация стала очевидной лишь в 70-е годы.

Кризисные явления в ГСЗ начали ощущаться не только в результате бесконечных споров о природе волн. Все чаще стали появляться большое число противоречивых разрезов земной коры, построенных разными авторами по одному и тому же материалу, но с применением различных подходов к интерпретации волновых полей.

Очевидным кризис стал, когда появился механизм проверки правильности выполненных построений. Это оказалось возможным с внедрением в практику ГСЗ компьютеров и с созданием методов решения прямых и обратных задач для горизонтально-неоднородных сред. Первые решения прямой кинематической задачи (расчёт лучей и годографов, преломлённых и отражённых волн) в горизонтально-неоднородной среде появились еще в 60-х годах, (А.С. Алексеев, В.Н. Пилипенко и др.) и они сразу же начали применяться в ГСЗ [Павленкова и др., 1972]. Программы решения прямой задачи для горизонтально-неоднородных сред позволили обнаружить для большей части разрезов ГСЗ существенные расхождения между расчётными и наблюдаемыми годографами. Как правило, эти расхождения были связаны с завышенными скоростями по границам внутри земной коры [Павленкова, 1999].

Анализ причин этих невязок показал, что завышенные скорости появились там, где построение преломляющих границ проводилось не по первым, а по последующим вступлениям, то есть отражённые волны интерпретировались как головные. О том, что последующие вступления формируются, в основном, отражёнными волнами, было показано еще в начале 60-х годов после первых теоретических расчётов интенсивности этих волн в неоднородных средах. Но они рассматривались как критические отражения, и поэтому казалось естественным использовать их для построения сводных годографов головных волн, поскольку в критической области эти волны практически совпадают. Однако оказалось, что регистрируемые в ГСЗ отражения имеют значительную интенсивность в предкритической области, и их кажущиеся скорости гораздо выше, чем граничная скорость соответствующей отражающей границы [Павленкова, 1973]. Интерпретация этих волн как головных и привела к завышению скоростей по внутрикоровым границам. Это было массовой ошибкой многих сейсмических разрезов, построенных в 50-60 годы. Положение было серьёзным, так как в работы ГСЗ были вовлечены многие организации, отработано огромное число профилей, часть из которых были положены в основу проектов сверхглубокого бурения. В такой обстановке многим трудно было признаться в допущенных ошибках и отказаться от своих разрезов, от уже написанных статей, защищенных диссертаций. Кто-то получил награды и должности за работу, и пересмотр результатов был очень болезненным. Драматичной была ситуация и для геологов, доверие к разрезам ГСЗ рухнуло. Дело доходило до прямых конфликтов, Н.И. Павленкова, с присущей ей категоричностью, стала активным сторонником пересмотра всех разрезов в Институте геофизики АН УССР, в результате на неё опять, как в студенческие годы, поступил донос «о подозрительной связи с иностранными коллегами», стали переманивать лучших сотрудников, стало ясно, что ей не дадут защитить докторскую диссертацию. И все же в конце 60-ых годов рядом специалистов была начата систематическая переинтерпретация старых материалов с применением новых методических приёмов. Такая переинтерпретация продолжалась и в последующие годы и даже десятилетия. Но в то же время продолжали публиковаться материалы, обработанные на основе устаревших приёмов. Способствовали этому публикации данных ГСЗ в различных сборниках, практически не рецензируемых, в которых главное внимание уделялось геологическому истолкованию разрезов земной коры, а не их обоснованности. Поэтому Нинель Ивановна стала инициатором того, чтобы при публикации новых разрезов обязательно показывались первичные материалы (монтажи сейсмограмм) и приводились результаты проверки разрезов решением прямой задачи.

Но фатальной точкой кризиса стали результаты бурения Кольской сверхглубокой скважины. Данные бурения [Козловский, 1984] сравнивались с проектным разрезом 20-летней давности, на котором на глубине 7 км была показана преломляющая граница со скоростью 6.5-7.0 км/с, так называемый “базальтовый слой” [Литвиненко, 1968]. Скважина не вскрыла ни базальтового слоя, ни границы с такими скоростями. Для специалистов ГСЗ это не явилось большой неожиданностью, так как к тому времени материалы по Балтийскому щиту были пересмотрены, и протяжённых преломляющих границ с большими скоростями (6.8-7.0 км/с) в верхней части коры на новых разрезах уже не существовало. Но среди геологов и геофизиков других специальностей несоответствие проектного разреза данным бурения вызвало шок: вместо базальтового слоя были вскрыты гранито-гнейсы с меньшими скоростями, чем в перекрывающей их Печенгской серии. Это было огромным ударом по престижу ГСЗ, под сомнение были поставлены все предыдущие построения, и в результате резко сократился объем исследований этим методом.

При более детальном рассмотрении всего материала оказалось, что главная ошибка была в упрощённом понимании природы сейсмических границ, как границ геологических, приуроченных к

контактам пород разного состава. Анализ физических свойств пород, вскрытых скважиной, показал, что субгоризонтальная граница на глубине 7 км (бывший “базальтовый” слой), связана с областью повышенной пористости и анизотропии скоростей. Это – физическая граница, наложенная на геологическую структуру [Минц и др., 1987, Павленкова, 1989]. Нет сомнения, что такие границы играют важную роль в структурном плане сейсмических разрезов земной коры. То есть данные бурения вскрыли не столько ошибочность построений ГСЗ, сколько ошибочность геологической трактовки сейсмических границ.

Более того, детальные работы ГСЗ в районе скважины (при расстоянии между приборами 100 м и между источниками 10-20 км) показали перспективность изучения с помощью закритических отражений не только пологих, но и круто наклоненных сейсмических границ. Отражающие площадки, построенные по данным детального ГСЗ достаточно правильно охарактеризовали строение верхней части коры в районе скважины, во всяком случае, не хуже, чем проведённые работы ОГТ.

Критическое осмысление результатов бурения и проведённых ранее исследований ускорило намечившуюся в конце 60-х годов тенденцию изменения методических основ ГСЗ, создание новой экспериментальной базы и новых методов обработки волновых полей. Это привело к новому этапу глубинных исследований в 70-80-ые годы. Главным критерием достоверности новых разрезов стали результаты решения прямой задачи. К концу 70-х годов основная часть старых разрезов была переинтерпретирована, и они были представлены в работах [Зверев, Косминская, 1980; Павленкова, 1974, 1989 и др.]. Было показано, что данные бурения вскрыли не столько ошибочность построений ГСЗ, сколько ошибочность геологической трактовки сейсмических границ.

В то же время в Киеве Нинель Ивановна предложила талантливому аспиранту, математику Пилипенко В.Н. наиболее перспективное, по её мнению, направление в плане экспериментального изучения гетерогенных сред – построение по волновым полям ГСЗ сейсмических изображений, подобных разрезам метода отраженных волн. Речь идет о применении миграционной техники для обработки сейсмограмм, полученных на большие удаления от источника, то есть к полям закритических отраженных и преломленных волн. Первые попытки таких построений были выполнены на основе метода полей времен, и это позволило использовать миграцию для построения волновых разрезов по преломленным и закритическим отраженным волнам. Таких алгоритмов для преломленных волн за границей еще не создали, да они и не могут быть созданы там, поскольку классические разработки корреляционного метода преломленных волн и метод полей времен так до сих пор и не получил там должного распространения. Нет там и эффективных алгоритмов по миграции закритических отражений, использованный для этих целей метод решения волнового уравнения по формуле Кирхгофа не дал пока достаточно хороших результатов. Метод Пилипенко, основанный на решении волнового уравнения методом конечных разностей, напротив с первого применения доказал свою эффективность даже на современных, недостаточно детальных для этого данных ГСЗ. Такие решения долгое время считались неприемлемыми для задач миграции отражений, записанных на удалениях 100-200 км и при глубине до отражающей границы в десятки километров.

Первые же результаты конечно-разностной миграции, полученные для профиля ГСЗ POLAR на Балтийском щите [Пилипенко и др., 1999] превзошли все ожидания. Несмотря на большие расстояния между сейсмическими станциями (2-3 км) и между источниками (порядка 80 км) полученный волновой разрез существенно повысил информативность материалов ГСЗ по этому профилю. Миграция закритических отражений позволила не только детально изучить структуру границы М по Р- и S-волнам, но и выявить новые особенности внутренней структуры земной коры. На разрезе удалось проследить наклонные отражения, по которым от дневной поверхности почти до границы М были протрассированы известные тектонические нарушения.

Были выявлены важные детали строения земной коры Балтийского щита, которые не удалось обнаружить при интерпретации обычными методами. Они позволяют включить в обработку все поле, регулярные волны и межволновой фон, и показать внутреннюю структуру гетерогенных пачек, интерпретируемых пока в виде простых сейсмических границ. Но для применения этой технологии необходимо существенно увеличить детальность систем наблюдений: расстояние между источниками должно быть сокращено минимум до 30-40 км, между приемниками – до 1 км.

Новые важные результаты были получены в результате миграции преломленных и закритических отраженных волн по профилю CINCA, пересекающему зону перехода континент-океан в районе Чили (международный проект). Методом лучевого моделирования европейскими специалистами был построен типичный для активной окраины континента скоростной разрез с погружающимся слэбом. Полученное же по этим материалам волновое изображение свидетельствует

о том, что никакого слэба здесь не наблюдается, а между континентом и океаном существует глубинный разлом [Пилипенко и др., 2006].

В районе Охотского моря аналогичная пере интерпретация данных ГСЗ позволила выявить сложную структуру нарушений вдоль Курильских островов, а также между островом Сахалин и Южно-Охотской впадиной. Здесь наблюдается смена типов земной коры и резкие отражающие горизонты, опускающиеся от границы Мохо до глубин в 70 км. Структура коры Южно-Охотской впадины относится к субокеаническому типу, в то время как другие районы Охотского моря относятся к континентальному типу [Pavlenkova et al., 2009].

Для обработки экспериментального материала этого профиля было использовано математическое моделирование на основе метода полей времен, а также метод миграции полей преломленных и отраженных волн, зарегистрированных на больших удалениях от источника.

Последняя статья Нинель Ивановны также посвящена результатам обработки данных методом миграции по профилю 5-AP, в северо-восточной шельфовой зоне Арктики от Чукотской складчатой области на континенте до глубокой Северо-Чукотской впадины. В результате с высокой степенью достоверности удалось не только выявить новые особенности строения земной коры и верхней мантии этого региона, но и определить реологические свойства слагающего их вещества, степени его жесткости или пластичности. [Павленкова, 2025].

Большое значение Павленкова Н.И. придавала международному сотрудничеству. Начиная со школы Г.А. Гамбурцева характерной чертой научной деятельности было широкое сотрудничество с геофизиками других организаций Союза и других стран и участие в международных сейсмических проектах.

Координирующим центром по всем глубинным сейсмическим исследованиям в СССР являлась организованная в 60-е годы Секция ГСЗ Научного Совета АН СССР, которая объединяла сотрудников разных организаций, но работала как единое целое. Возглавляла секцию И.П. Косминская. Совещания секции проводились ежегодно в самых разных регионах страны, от Кольского полуострова до Камчатки. На секции обсуждались задачи исследований, первичные материалы ГСЗ, их качество, работа аппаратуры и волновые поля. Детально рассматривались методы интерпретации полученных записей, корреляции волн, определения скоростей и все построения, выполненные разными организациями. На каждой секции заслушивались доклады о новых методах решения прямых и обратных задач, обсуждались их возможности. Затем все это публиковалось в специальных сборниках, что позволяло сопоставлять первичные материалы и результаты их интерпретации для разных тектонических структур и проводить обобщение полученных результатов [Модели..., 1967; Косминская, 1968]. Павленкова Н.И. принимала самое активное участие во всех мероприятиях Совета ГСЗ. Кроме того, в 60-е годы открылась возможность широкого международного сотрудничества. В 1968 году очередное совещание Секции ГСЗ было проведено в Ленинграде, и на это совещание по инициативе И.П. Косминской были приглашены ведущие сейсмологи и сейсморазведчики разных стран. Проведение такого международного совещания было необычным событием тех лет, так как уже четко существовало деление Европы на восточные и западные страны, между которыми практически не было никакого сотрудничества. Публикация научных работ проводилась в то время в СССР только на русском языке, так что за рубежом практически ничего не знали об огромном объеме проведенных в стране глубинных исследований. Этим, очевидно, объясняется, почему на Ленинградское совещание приехали ведущие специалисты США и европейских стран: глава геофизической службы США И.Смитс [James, Smith, Steinhard, 1968], известный сейсмолог А. Хейлс [Hales, 1969; Green, Hales, 1968] и сейсморазведчики из ФРГ Р. Майснер и П. Гизе.

На этом совещании был представлен огромный объем материалов ГСЗ по детальному изучению строения земной коры самых разных регионов: горных сооружений Памира и Кавказа, глубоких платформенных впадин, впадин внутренних морей и переходных зон от континентов к океанам (Сахалино-Хоккайдо-Приморской зоны, Восточной Антарктиды). В результате это совещание превратилось в крупное событие высокого международного уровня и триумфом советского ГСЗ. Следует отметить при этом, что обстановка на совещании была доброжелательной, она располагала к сотрудничеству между странами, уже разделенными на западный и восточный блоки.

Ленинградское совещание оказало большое влияние на дальнейшее развитие глубинных сейсмических исследований во всем мире [Giese et al., 1976; Fuchs, Vinnik, 1982]. В СССР оно способствовало интенсивному развитию новых экспериментальных работ ГСЗ и их методических основ [Материалы ..., 1969; Строение ..., 1978; Сейсмические ..., 1980; Рябой, 1979; Юров и др., 1980]. Появились работы советских ученых в иностранных журналах [Yegorkin, Pavlenkova, 1981; Kashubin et al., 1984; Egorin et al., 1987]. С тех пор статьи Нинель Ивановны регулярно публиковались в ведущих зарубежных журналах.



Фото 5. Ленинградское международное совещание 1968 года. В президиуме Н.Н. Пузырев, И.П. Косминская, I. Smith и А.И. Hales. Слева Н.И. Павленкова

Важным решением совещания была организация международной комиссии по проведению глубинных сейсмических исследований, аналогичной Секции ГСЗ. Эта комиссия была впоследствии официально оформлена при IASPEI под названием Комиссия по Сейсмологии Контролируемых Источников (КСКИ) и ее сопредседателями были утверждены С. Мюллер (S. Mueller) и И.П. Косминская. Нинель Ивановна активно участвовала в этой работе, будучи членом Комиссии. Благодаря уникальным личностным качествам лидера советских ГСЗ-шников И.П. Косминской такое сотрудничество переросло в настоящую дружбу, велся широкий обмен данными, компьютерными программами, общались не только в институтах, но и дома в гостях.

ИФЗ принял активное участие в мероприятиях Международного Геофизического года (1957-1958 год). В рамках этой программы было проведено глубинное сейсмическое зондирование в переходной зоне от Азиатского континента к Тихому океану [Гальперин, Косминская, 1958]. Выше уже отмечалось, что подобных работ не было в то время в мире, и школа Г.А. Гамбурцева долгие годы была «законодателем мод» и в аппаратуре, и в методике морских и наземных исследованиях ГСЗ.

Затем по международному проекту NASP силами ИФЗ был отработан профиль вдоль Фарерско-Исландского порога [Зверев и др., 1975]. Эти работы имели огромное значение для понимания структуры коры Северной Атлантики: было показано, что кора под порогом имеет такую же мощность, что и континентальная кора (30 км), но она более высокоскоростная. Изучение этой ключевой для геодинамики зоны было продолжено в 1975-76 годах на территории Исландии совместно с исландскими сейсмологами. Были выполнены детальные наблюдения в ряде районов острова. Затем вместе с немецкими геофизиками был отработан профиль RRISP, секущий Исландию с юга на север. Павленкова Н.И. принимала участие как в полевых, так и в камеральных работах в Исландии и конечно в интерпретации полученных результатов.

Отметим, что интерпретация материалов этих исследований была проведена немецкими и советскими исследователями по-разному. Последние показывали, что мощность коры под Исландией близка к мощности Фарерско-Исландского порога, то есть она не является типично океанической [Pavlenkova, Zverev, 1981]. Немецкие и исландские геофизики придерживались иной точки зрения [Gebrende et al., 1980]. Последние сейсмические работы в этом регионе подтвердили точку зрения советской группы интерпретаторов: кора в Исландии действительно оказалась толстой – 28 км.

Сотрудничество между СССР и западными странами способствовало сближению методических основ и экспериментальной базы глубинных сейсмических исследований. При работах в Исландии были сопоставлены параметры регистрирующей аппаратуры и сотрудники ИФЗ с удовлетворением отметили, что собранные ими самодельные сейсмостанции не хуже зарубежных по всем параметрам, а по простоте обслуживания опережают их.

Это способствовало дальнейшему участию ИФЗ в других международных проектах, например, в совместных работах с финскими сейсмологами по проведению работ ГСЗ в Финляндии в рамках Международного проекта «Европейский геотраверс» и по отработке профиля ГСЗ «Балтик». Сотрудничество ИФЗ с финскими сейсмологами было особенно продолжительным и плодотворным, было опубликовано большое число совместных работ и решены многие вопросы структуры земной коры Балтийского щита [Pavenkova, 2000].

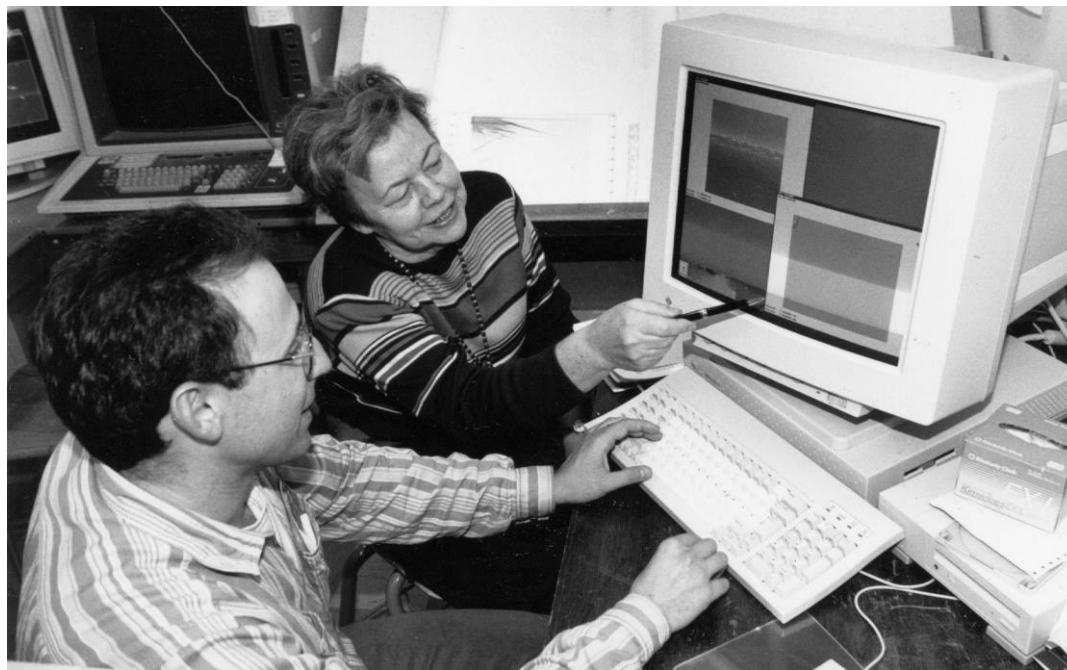


Фото 6. Павленкова Н.И. за работой

В 1973 г. Н.И. Павленкова переехала в г. Москву, защитила докторскую диссертацию и перешла по конкурсу на работу в лаб. ГСЗ ИФЗ РАН в отделение, возглавляемое В.В. Белоусовым. Впервые она увидела Владимира Владимировича на большом международном совещании в Москве. Белоусов был главным организатором и ведущим совещания, на котором обсуждался отчет по международному проекту «Верхняя мантия». Проект был организован по инициативе Белоусова, и он руководил им в течение нескольких лет. Обсуждаемые результаты и задачи проекта сразу вызвали огромный интерес Нинель Ивановны, а идеи Владимира Владимировича оказали огромное влияние и во многом определили дальнейший путь её научной деятельности. Стоит сказать немного о личности В.В. Белоусова, и почему он имел такое значение для Н.И. Павленковой. Она сама хотела написать воспоминания о нем и оставила некоторые наброски, но этого недостаточно, поэтому далее будут приведены выдержки из книги другой сотрудницы Владимира Владимировича о научном наследии Белоусова В.В. и его роли в науке [Иогансон, 2021].

В 60-70-е годы Белоусов В.В. был самым известным в мире советским учёным в области наук о Земле. Он был член-корреспондентом АН СССР, Председателем Межведомственного геофизического комитета при АН СССР, которым он руководил 30 лет, иностранным членом Американского геологического общества, Королевской академии наук Швеции, Лондонского геологического общества, Геологического общества Бельгии, Индийского геологического и геофизического общества Индийской АН, Национальной итальянской АН. В США переведён и опубликован его фундаментальный труд «Основные вопросы геотектоники», в 1960 году его избирают Президентом МГТС (Международный союз геодезии и геофизики), где им был предложен проект «Верхняя мантия». В итоге выполнения Проекта Верхней мантии в 60-70-х годах специалистами различного профиля из 48 стран на разных континентах произошел колоссальный прорыв в знаниях о строении верхних оболочек земного шара. Результаты по Проекту обсуждались на десятках конференций и симпозиумах и изложены в сотнях работ специалистов разных стран [Белоусов, 1989]. С 1980 года под руководством Белоусова В.В. разрабатывается международный проект «Литосфера», развивается концепция эндогенных режимов [Белоусов, Павленкова, 1986]. В рамках этого проекта В.В. Белоусовым и Н.И. Павленковой были предложены методические подходы для составления карт глубинного строения земной коры и верхней мантии.

Осуществление крупномасштабных исследований на материках и в океанах привело к выявлению новых принципиальных глобальных особенностей строения Земли. Впервые было изучено строение земной коры океанов. Именно на результатах этих исследований родилась тектоника плит, что стало называться «революцией в геологии».

По воспоминаниям коллег, Владимир Владимирович сначала даже не поверил, что это серьезно, называл движение континентов «абсолютно бесплодной идеей», и не хотел даже обсуждать её. Но пути науки неисповедимы. Плитовая тектоника так быстро завладела умами западных ученых, что одинокая критика Белоусова не была услышана. Конечно, была широкая дискуссия с адептами новой гипотезы, в том числе с автором плитовой тектоники, Дж.Т. Уилсоном, но почти все они, считавшие прежде Владимира Владимировича «королём» геотектоники, оставив научные аргументы, стали прямо или косвенно упрекать его в косности мышления и даже в неспособности принять «революционные» идеи науки из-за «советского воспитания», дескать он не может принять выдающиеся успехи западных коллег по идеологическим соображениям. Это было шоком для тех коллег Владимира Владимировича, которые отстаивали его позицию, в том числе, Нинель Ивановны. Очень быстро всё научное сообщество разделилось на «мобилистов» и «фиксистов». Иогансон Л. отмечает «основное свойство всех будущих дискуссий по плитовой тектонике – это автономная, а потому неуязвимая система аргументов. Обсуждение проблемы происходит совершенно в различных плоскостях – если Белоусов утверждал, что геотектоника для построения обоснованной теории, всё ещё нуждается в сборе фактических материалов, которых катастрофически мало для знания о глубинных процессах, то Уилсон в ответ просто цитирует Т. Куна, заявившего, что революцию в науке делает не количество фактов, но изменение их трактовки. В этой конкретной дискуссии отчётливо прослеживается прежде всего мировоззренческая пропасть, через которую договориться невозможно».

В результате, получивший широкое признание мирового геологического сообщества как автор классических работ по геотектонике, основатель экспериментального направления в геотектонике – тектонофизики – автор глубоко обоснованных геотектонических концепций, В.В. Белоусов теперь, в основном, известен как противник плитовой тектоники и защитник скомпрометированного фиксизма.

Всё это было началом новой эпохи в геотектонике, в которой Белоусову В.В. была уготована совсем другая роль, не победоносная, а драматическая, со всеми вытекающими последствиями. Но он остался до конца верным наработанным представлениям о закономерностях тектогенеза и не поддавался новым идеям, на первых порах совершенно перечёркивающим всё достояние существующей тогда геотектоники. Всю эту ситуацию тяжело переживали его сторонники, особенно когда изменилось отношение к В.В. Белоусову в научных учреждениях. Постепенно его стали выводить с руководящих позиций. Кроме того, когда в 1980 г. его кандидатура была выдвинута на премию, в Комитет по Ленинским и Государственным премиям поступило письмо от академика А.Л. Яншина, в котором он писал, «что присуждение Ленинской премии за представленные работы Белоусову вызвало бы величайшее недоумение в широких кругах советских и зарубежных геологов, потому что их автор совершенно отрицает горизонтальные движения блоков и плит земной коры, и отрицает или не замечает огромное количество фактов, которые давно уже стали достоянием широких кругов научной общественности» и т.д. Ленинскую премию Белоусову не присудили, а его работы были опубликованы в издательстве «Недра», в «Науке» они уже не могли быть опубликованы [Иогансон, 2021].

Для Белоусова это было очень болезненным, хоть он и не подавал вида, Нинель Ивановна вспоминала, что была на одном из последних заседаний Президиума АН, когда рассматривали кандидатуру Белоусова В.В. в академики: «всем было очевидно, что более заслуженного кандидата не существует, и кто-то из академиков даже сказал, что если мы и на этот раз не выберем Белоусова, то это будет позор для всей нашей Академии. И этот позор состоялся. Открыто выступал против Яншин, который в это время стал Академиком-секретарем Отделения. Он назвал Белоусова тормозом в науке, поскольку он преграждает дорогу плитовой тектонике. Остальные отмалчивались, но проголосовали против. Сейчас, когда те же академики признают, что плитовая тектоника не оправдала их надежд, что она не может объяснить многие явления в геологической истории, особенно обидно вспоминать об этом позоре, который уже не исправить». Вся эта история была принята Павленковой Н.И. как личная трагедия, и оказала решающее влияние на всю дальнейшую деятельность. Все последующие годы она тщательно собирала новые данные, противоречащие плитовой тектонике и подтверждающие идеи Белоусова, пыталась найти свою геотектоническую гипотезу, основанную на идеях и подходах своего, как она называла «великого учителя». И такие возможности появились.

В 70-80-е годы по правительственной программе были проведены исследования на опорных сверхдлинных сейсмических профилях. Выполняла эту программу Специальная Региональная Геофизическая Экспедиция (СПГЭ, Мингео СССР, ныне Центр ГЕОН). Основная задача этих работ заключалась в получении однотипных данных о строении земной коры и верхней мантии на громадной территории Северной Евразии, охватывающей разные по возрасту и геологическому развитию тектонические структуры. Работы СПГЭ с самого начала планировались как комплексные многоволновые исследования: использовались поля продольных и поперечных волн, записанных 3-х компонентными автономными станциями, в которых выделялись не только преломлённые и отражённые волны, но и обменные волны от взрывов и землетрясений. Новые достижения в аппаратуре и в методах обработки трёхкомпонентных записей легли в основу работ ГСЗ.

Другой важной задачей опорных профилей было сверхглубинное зондирование с помощью ядерных взрывов. Для этого на профилях в 2000-3000 км одновременно выставлялись 200-300 станций, которые регистрировали 2-4 ядерных взрыва. Впервые взрывная сейсмология проникла на глубины в 700 км со строгой системой встречных годографов и надежным прослеживанием мантийных волн [А.В. Егоркин, 1999]. В результате были получены уникальные данные о структуре верхней мантии и ее связи с приповерхностной геологией. Помимо известных из сейсмологии границ на глубине 400 и 680 км, было доказано существование сейсмической границы на глубине 520 км внутри переходной зоны между верхней и нижней мантией, выявлены протяжённые сейсмические границы на глубине порядка 100 км и установлены аномально высокие скорости (до 8.5 км/с) в верхах мантии Сибирской платформы [Павленкова, 2006].

Работы СПГЭ-ГЕОНа отличались и особой системой интерпретации полученных материалов, разработанной А.В. Егоркиным. Для нее характерны полнота и разнообразие применяемых приёмов обработки записей. Трудно назвать метод или какую-либо конкретную программу, которые не были бы использованы в этой системе. Здесь были внедрены в производственный поток все существующие методы машинного анализа волновых полей: спектральный анализ, адаптивная фильтрация, поляризационный анализ, выделение обменных волн и построение по ним монтажей. Наряду с этими машинными методами использовались и все другие способы анализа кинематических и динамических особенностей волн, определения их природы, построения преломляющих и отражающих горизонтов, вычисления пластовых скоростей Р- и S- волн, определение добротности и многое другое.

Ранее основными методами исследований верхней мантии являлись сейсмологические методы, основанные на записях землетрясений мировой сетью сейсмологических станций. Данные сейсмологии позволили определить главные особенности внутреннего строения Земли: выделить ядро, разделить его на внешнее и внутреннее ядро, а мантию – на верхнюю и нижнюю. Было показано также, что между верхней и нижней мантией существует мощный переходный слой: кровля этого слоя располагается на глубине около 410 км, подошва – на глубине 660-680 км. Предполагалось также наличие в верхней мантии слоя с пониженными скоростями, волновода, на глубине 100-200 км, названного астеносферой.

В целом работы, проведенные на длинных сейсмических профилях с ядерными взрывами, позволили детально исследовать структуру верхней мантии и переходной зоны к нижней мантии на огромной территории Северной Евразии, которая недоступна сейсмологическим исследованиям как асейсмичный регион. Получены уникальные записи мантийных волн, которые еще долгое время будут основой для детального исследования структуры верхней мантии. Данные о характере неоднородности верхней мантии, о региональных сейсмических границах позволят в будущем, по мере накопления материалов других методов, составить обоснованные модели геодинамических процессов, создающих платформенные части континентов [Павленкова, 2014].

В конце 80-х годов, после окончания крупного международного проекта «Европейский геотраверс», по которому усилием многих западноевропейских институтов был отработан геофизический геотраверс от Баренцево моря до Африки, был задуман международный проект EUROPROBE («Европроба») по изучению структуры и динамики литосферы Европы. Большая часть проектов данной программы осуществлялась в Восточной Европе. Это был самый крупный проект по международной программе LITHOSPHERE, главной задачей которой было изучение динамики литосферы и проблем происхождения и эволюции континентов, и обеспечение тесного международного сотрудничества не только западных, но и всех стран Европы по изучению эволюции европейских геоструктур от Урала до Атлантики и различий в системе литосфера-астеносфера между Западной и Восточной Европой.

В 1990 году была создана группа по подготовке проекта под председательством Дэвида Джи (Швеция) и Карла Фукса (Германия). От России в разработке программы и ее осуществлении активное участие приняли от Министерства Геологии Е.А. Козловский, затем А.Ф. Морозов, от Академии наук А.Л. Яншин, Н.А. Богданов и Ю.Г. Леонов.

Предполагалось выполнить новые проекты, которые позволили бы улучшить понимание тектонической эволюции земной коры и верхней мантии, а также динамические процессы, которые контролируют эту эволюцию во времени.

Работы проводились в тесном сотрудничестве специалистов разных стран. Список научных и производственных организаций, принявших участие в работах по программе EUROPROBE составляет 240 организаций из всех стран Европы, а также из США, Канады и Бразилии. В работах программы приняли участие 55 организаций из 20 городов России. Наибольшую кооперацию потребовали крупные геофизические эксперименты, проведенные на Урале (проект Uralides), на Балтийском щите (проект Svekalarka), на западе Восточно-Европейской платформы (проект Eurobridge) и в Днепровско-Донецкой впадине (проект Georift). Uralides. Они были осуществлены благодаря объединению аппаратной базы многих институтов Европы и Америки и помощи производственных организаций Беларуси, России и Украины в проведении полевых работ.

Павленкова Н.И. вошла в оргкомитет проекта от РФ и приняла активное участие как в обработке полученных экспериментальных данных, так и во всех дискуссиях по результатам работ, обсуждаемых на десятках совещаний и конференций в рамках этого проекта.

Эта программа объединила, в основном, сторонников тектоники литосферных плит. Это было естественным, так как в западных странах эта геотектоническая концепция является практически всеобщей и другие концепции не обсуждаются. Со стороны восточных стран в программу вошли также сторонники тектоники плит или ими стали многие ранее «нейтральные» геологи и геофизики. Наверно это было единственной возможностью плодотворного сотрудничества в рамках одной программы. Но в определенной мере это было и ее недостатком, так как многие опытные специалисты не были привлечены к работе по программе, а главное, не обсуждались проблемы, которые трудно разрешить в рамках только тектоники плит. По материалам этого проекта, продлившегося до 2002 г. на Западе опубликованы сотни статей и заключительная монография, но ни все работы, особенно из РФ были учтены, поэтому Нинель Ивановой было принято решение выпустить по результатам программы EUROPROBE свою монографию на русском языке, где не будет запрета на неудобные результаты и выводы авторов, работавших в регионах до и во время проведения проекта. Её поддержал Мингео в лице Морозова А.Ф., организовав издание книги «Строение и динамика литосферы Восточной Европы» под ред. Морозова и Павленковой [Строение..., 2006].

В данной монографии приведены результаты работ, выполненных по программе EUROPROBE в Восточной Европе: «Svekalarka», «Eurobridge», «Georift», «Uralides», «Timpebar», «Kimberlite».

Основные задачи монографии могут быть сформулированы следующим образом

- анализ результатов проведенных работ в свете предыдущих геологических и геофизических исследований в соответствующих регионах,
- обобщение всей совокупности имеющихся материалов по каждому региону и создание главных концепций геологического развития изученных геоструктур,
- характеристика общих черт и различий в строении и геологическом развитии главных геоструктур Восточной и Западной Европы.

Работа над монографией проводилась в течение 2002-2004 годов и была организована следующим образом. Был составлен план монографии с ответственными исполнителями по каждой главе. В каждой главе представлялись не только результаты работ по проекту, но и работ, проведенных в соответствующих регионах вне проектов, и анализ предыдущих исследований. В книге помимо введения, шести основных глав, пять из них освещают результаты работ по перечисленным выше проектам, шестая глава посвящена обобщению геофизических исследований строения литосферы для всей Восточной Европы, в сравнении с западной частью континента. В заключении кратко формулируются основные результаты работ по всей программе и нерешенные проблемы. Павленкова Н.И. стала не только редактором этой работы, но и соавтором 1-й и 6-й глав, и автором заключения.

Монография не ограничена для представления различных моделей и концепций геологического истолкования результатов проведенных исследований. Несмотря на многолетнее сотрудничество различия взглядов между восточными и западными исследователями пока еще сохраняются. Это касается даже используемой терминологии. Например, на западе Восточно-Европейскую платформу

принято называть Восточно-Европейским кратоном, Балтийский щит – Фенноскандинавским щитом. Российским ученым трудно отказаться от привычных названий практически собственных имен. Не удалось избежать в данной книге и различий в названиях отдельных геоструктур или геофизических аномалий, разной терминологии, использованных российскими авторами. Однако, в целом, книга демонстрирует существенный прогресс во взаимопонимании между отдельными исследователями и различными геологическими и геофизическими организациями Европы по вопросам структуры и динамики литосферы Европейского континента. В этом состояла одна из главных задач программы EUROPROBE [Строение и динамика..., 2006].



Фото 7. Павленкова Н.И. с Пилипенко В.Н. (а); с коллегами (б): П. Гизе (ФРГ), В.И. Шаров (Москва, ГЕОН), Н. Тибо (Дания)

Новые данные появились не только в науках о Земле, но и в смежных естественных науках, физике, химии, биологии, которые свидетельствуют о том, что наши представления о процессах эволюции и структуры Земли, литосферы, нуждаются в пересмотре, адаптации к новым знаниям. Накопившиеся экспериментальные данные глубинного сейсмического зондирования на суше и море, полученные в течение 1960-2000 гг. в России и за рубежом, а также глубинных исследований ядерными взрывами дает возможность Нинель Ивановне по-другому взглянуть на проблемы глобальной геофизики: формирование континентальной литосферы, природу сейсмических границ и слоев с пониженными скоростями в верхней мантии, роль глубинных флюидов в структурных преобразованиях литосферы, проблему механизмов формирования земной коры разного типа и их связи с дегазацией Земли. Развивая идеи Белоусова В.В. предложить свою комплексную модель формирования континентов и океанов, в которой к уже существующим моделям добавлен процесс образования разных типов коры и литосферы за счет неоднородной по площади адвекции глубинных флюидов. В серии работ [Павленкова, 2002; 2003; 2011; 2014; 2019], описываются новые особенности строения тектоносферы, и делается попытка объяснить их в рамках некоторой комплексной геодинамической модели. Эта модель направлена на объяснение структур планетарного плана – континентов и океанов, и природы разного строения их коры и верхней мантии.

Павленкова Н.И. прожила яркую и очень интересную жизнь, смыслом которой всегда была работа. Её научная деятельность началась вместе с зарождением новых направлений в науке о Земле, она была лично знакома и сотрудничала с самыми известными и крупными учёными своей области интересов. Ею собраны, проинтерпретированы экспериментальные данные практически по всем глубинным сейсмическим профилям на территории бывшего СССР и многим за рубежом, построены разрезы земной коры и верхней мантии. Это позволило сделать важные обобщения и выводы о строении литосферы. Она стала автором метода редуцированных годографов и соавтором метода миграции преломленных и закритических отраженных волн. Ею написано более 300 научных статей, 3 монографии, сделано более сотни докладов на важнейших научных симпозиумах. Она была очень благодарна своим коллегам в РФ и за рубежом за совместную работу и особенно родному ИФЗ РАН за возможность заниматься тем, что она больше всего любила.

Биографический очерк, фотографии и список литературы подготовлены дочерью Н.И. Павленковой – Галиной Александровной Павленковой

Литература

1. *Алексеев А.С.* Некоторые обратные задачи теории распространения волн. // Известия АН СССР. Сер. Геофиз. 1962. №11. С. 1514–1531.
2. *Алексеев А.С., Гельчинский Б.Я.* О лучевом методе вычислений полей волн в случае неоднородных сред с криволинейными границами раздела // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. – Л.: Изд-во ЛГУ. 1959. Т.3. С. 11–37.
3. *Белоусов В.В., Павленкова Н.И.* Взаимодействие земной коры и верхней мантии // Геотектоника. 1986. №6. С. 8–20.
4. *Белоусов В.В.* Основы геотектоники. – М.: Недра. 1989. 382 с.
5. Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн / Под ред. Г.И. Петрашени. – Л.: Наука. Сб. I. 1957; Сб. II. 1958; Сб. III. 1959.
6. *Галкин И.Н.* Облегчает ли ЭВМ жизнь сейсмолога? // Знание-сила. 1981. С. 16–19.
7. *Гальперин Е.И., Косминская И.П.* Особенности методики ГСЗ на море // Изв. АН СССР, сер. геофиз. – М.: Наука. 1958. №7. С. 45–58.
8. *Гамбурцев Г.А. и др.* Корреляционный метод преломленных волн. – М.: АН СССР. 1952.
9. *Гамбурцев Г.А.* Избранные труды. (Ред. Ризниченко Ю.В.). – М.: АН СССР. 1960. 461 с.
10. *Егоркин А.В.* Глубинные сейсмические исследования с трехкомпонентной регистрацией смещения почвы // Физика Земли. 1999. №7-8. С. 44–64.
11. *Егоркин А.В.* Изучение мантии на сверхдлинных геотраверсах // Физика Земли. 1999. №7-8. С. 114–130.
12. *Зверев С.М., Косминская И.П., Красильщикова Г.А., Михота Г.Г.* Глубинное строение Исландии и Исландско-Фарерско - Шотландского региона по результатам сейсмических исследований (НАСП-72) // Бюл. МОИП. Отд. геол. – М.: Наука. 1975. №3. С. 15–23.
13. *Зверев С.М., Косминская И.П.* Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР. – М.: Наука. 1980. 184 с.
14. *Иогансон Л.* К истории геологии и не только. – М.: ГЕОС. 2021. 432 с.
15. *Козловский Е.А.* Кольская сверхглубокая. – М.: Недра. 1984. 440 с.
16. *Косминская И.П.* Метод глубинного сейсмического зондирования земной коры и верхов мантии. – М.: Наука. 1968. 227 с.
17. *Косминская И.П., Пузырёв Н.Н., Алексеев А.С.* Сейсмология взрывов – ее прошлое, настоящее и будущее // Вестник АН СССР. 1972. Вып.9. С. 44–54.
18. *Литвиненко И.В.* О некоторых результатах изучения глубинных разрезов земной коры различных структурно-фациальных зон Кольского полуострова и Карелии // Геология и глубинное строение восточной части Балтийского щита. – Л.: Наука. 1968. С. 185–190.
19. Материалы Международного совещания экспертов по взрывной сейсмологии. Межвед. геофиз. ком. при Президиуме АН СССР. Ин-т геофизики АН УССР. – Киев: Наукова думка. 1969. 242 с.
20. *Милиц М.В., Колтаков Н.И., Ланев В.С. и др.* К вопросу о природе внутрикоровых субгоризонтальных сейсмических границ. Интерпретация результатов бурения Кольской сверхглубокой скважины // ДАН. 1987. Т.296. №1. С. 71–76.
21. Модели реальных сред и сейсмические волновые поля. Ред. Берзон К.С. – М.: Наука. 1967. 248 с.
22. *Павленкова Н.И.* Структура земной коры и верхней мантии и глобальная геотектоника // Спорные аспекты плитовой тектоники и возможные альтернативы. – М.: ОИФЗ РАН. 2002. С. 64–83.
23. *Павленкова Н.И.* Волновые поля и модели земной коры (континентального типа). – Киев: Наукова думка. 1973. 219 с.
24. *Павленкова Н.И.* Интерпретация рефрагированных волн способом редуцированных годографов // Физика Земли. 1973. №8. С. 69–100.
25. *Павленкова Н.И.* Кольская скважина и ее значение для глубинных сейсмических зондирований // Советская геология. 1989. №6. С. 17–23.
26. *Павленкова Н.И.* Основные результаты глубинных сейсмических зондирований за 50 лет исследований // Региональная геология и металлогения. 1999. №10. С. 12–21.
27. *Павленкова Н.И.* Реологические свойства верхней мантии Северной Евразии и природа региональных границ по данным сверхдлинных сейсмических профилей // Геология и геофизика. 2011. Т.52. С. 1287–1301.

28. Павленкова Н.И. Ротационно-флюидная модель глобального тектогенеза / Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений (к 100-летию со дня рождения П.Н. Кропоткина). – М.: ГЕОС. 2011. С. 69–92.
29. Павленкова Н.И. Строение земной коры Северо-Чукотского Арктического шельфа по данным миграции поля преломлённых и отраженных волн (профиль 5-АР) // Физика Земли. 2025. №1. С. 150–163.
30. Павленкова Н.И. Структура верхней мантии Сибирской платформы по данным, полученным на сверхдлинных сейсмических профилях // Геология и геофизика. 2006. Т.47. №5. С. 630–645.
31. Павленкова Н.И. Структура земной коры и верхней мантии и механизм движения глубинного вещества // Проблемы глобальной геодинамики. 2003. Вып.2. С. 168–182.
32. Павленкова Н.И. Структурные особенности литосферы континентов и океанов и их природа. – М.: ГЕОС. 2019. 155 с.
33. Павленкова Н.И., Бурьянов В.Б., Гордиенко В.В. Обобщенная геофизическая модель земной коры некоторых геоструктур Украины. Геофизический Сборник АН УССР. – Киев: Наукова Думка. 1974. Вып.62. С. 16–23.
34. 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.
35. Павленкова Н.И., Пилипенко В.Н., Роман В.А. Методика составления скоростных разрезов земной коры. – Киев: Наукова Думка. 1972. 214 с.
36. Павленкова Н.И., Пиенчик И. Математическое моделирование при решении двумерной обратной задачи при ГСЗ // Физика Земли. 1982. №2. С. 12–22.
37. Петрашень Г.И., Алексеев А.С., Гельчинский Б.Я. Элементарная теория распространения сейсмических волн / Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. – Ленинград: ЛГУ. 1959. Сб.3. С. 7–160.
38. Пилипенко В.Н., Вернаховская А.О., Гизе П., Павленкова Н.И. Формирование изображения среды по волновым полям ГСЗ по профилю CINCA-95 (Чили) // Геофизика. 2006. №6. С. 16–20.
39. Пилипенко В.Н., Павленкова Н.И., Луосто У., Вернаховская А. Формирование изображения среды по сейсмограммам ГСЗ // Физика Земли. 1999. №7-8. С. 164–176.
40. Ризниченко Ю.В. Геометрическая сейсмика слоистых сред // Труды института теоретической геофизики АН СССР. 1946. Вып.11.
41. Рябой В.З. Структура верхней мантии территории СССР по сейсмическим данным. – М.: Недра. 1979. 246 с.
42. Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР. – М.: Наука. 1980. 184 с.
43. Строение земной коры и верхней мантии Центральной и Восточной Европы – Киев: Наука. 1978. 269 с.
44. Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE. – М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС. 2006. Вып.2. 736 с.
45. Cervený V., Molotkov I.A., Psencik I. Ray method in seismology. Univerzita Karlovo. 1977.
46. Egorkin A.V., Zaganov S.K., Pavlenkova N.A., Chernishev N.M. Results of lithosphere studies from long-range profiles in Siberia, in Seismic Studies of the Continental Lithosphere // Tectonophysics. 1987. 08/140(1). P. 29–47.
47. Fuchs K., Vinnik L.P. Investigation of the subcrustal lithosphere and asthenosphere by controlled source seismic experiments on long-range profiles // Geodynamics Series. 1982. Vol.8. P. 81–98.
48. Gebrande H., Miller H., Einarsson P. Seismic structure of Iceland along RRJSP- Profile 1 // Geophysics. 1980. №47. P. 239–249.
49. Giese P., Prodehl C., Stein A. Explosion seismology in Central Europe. Data and Results. Berlin. 1976.
50. Green R.W.E., Hales A.L. The travel times of P waves to 30 degrees in the central United States and upper mantle structure // Bulletin of the Seismological Society of America. 1968. Vol.58(1). P. 267–289.
51. Hales A.L. A seismic discontinuity in the lithosphere // Earth and planet Sci. Lett. 1969. Vol.7. P. 44–46.
52. James D., Smith J., Steinhard J. Crustal structure of the Middle Atlantic States // J.G.R. 1968. Vol.73. №6.
53. Kashubin S.N., Pavlenkova N.I., Yegorkin A.V. Crustal heterogeneity and velocity anisotropy from seismic studies in the USSR // Geophys. J.R. astr. Soc. 1984. Vol.76. P. 221–226.
54. Pavlenkova N.I. Deep seismic studies of crust and upper mantle // Russian national centennial report of IASPEI Ran National Geophys. Committee. Moscow. 2000. P. 30–58.

55. *Pavlenkova N.I., Pilipenko V.N., Verpakhovskaja A.O., Pavlenkova G.A., Filonenko V.P.* Crustal structure in Chile and Okhotsk Sea regions // *Tectonophysics*. 2009. Vol.472. P. 28–38.
56. *Pavlenkova N.I., Zverev S.M.* Seismic model of Iceland's Crust // *Geologischau Rundschau*. 1981. Band70. P. 1–6.
57. *Pavlenkova N.I., Zverev S.M.* Seismic model of Iceland's Crust // *International Journal of Earth Science*. 1981. Vol.70. P. 271–281.
58. *Yegorkin A.V., Pavlenkova N.I.* Studies of the mantle structure of the USSR territory on long-range profiles // *Phys.Earth and Planet.Inter.* 1981. №25. P. 12–26.

Сотрудничество Н.И. Павленковой с Центром ГЕОН как развитие метода глубинных сейсмических исследований

В рамках принятой в 1972 г. программы Министерства геологии СССР «Система регионального изучения коры и верхней мантии вдоль геотраверсов, проложенных через районы бурения глубоких и сверхглубоких скважин», Специальная опытно-методическая геофизическая экспедиция (СОМГЭ), в последствие переименованная в Специальную региональную геофизическую экспедицию (СРГЭ) и позже в Центр ГЕОН им. В.В. Федынского (ГЕОН), специализировалась на выполнении глубинных сейсмических исследований земной коры и верхней мантии методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) вдоль сверхдлинных (до нескольких тысяч км) профилей-геотраверсов с использованием различных по мощности промышленных и мирных ядерных взрывов (до их прекращения в связи с подписанием в 1996 г. Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний).

На первых этапах работ регистрация упругих колебаний осуществлялась с использованием до 400 и более трехкомпонентных автономных аналоговых сейсмических станций «Тайга» и «Черепаша». Начиная с 1993 г. они были заменены на цифровые регистраторы серии «Дельта». Уникальность технологии работ заключалась в их одновременном включении для регистрации мощных взрывов на расстоянии до 3000 км и более. Это обеспечивало совместную обработку и интерпретацию рефрагированных (преломленных) продольных и поперечных, отраженных продольных и поперечных и обменных сейсмических волн, проходящих через земную кору и проникающих в верхние горизонты мантии до глубины 700 км. На значительной части профилей дополнительно реализовывалась методика обменных волн от удаленных землетрясений (МОВЗ). Использование многоволновых атрибутов существенно увеличивало не только надежность и достоверность результатов работ, но и обеспечивало получение комплексной всесторонней информации о строении литосферы Земли.

Нинель Ивановна Павленкова, еще будучи студенткой геологического факультета МГУ, в 1949 г. приняла участие в знаменитой экспедиции Института физики земли АН СССР под руководством Г.А. Гамбурцева, в ходе которой впервые в мире были проведены глубинные сейсмические исследования и получены уникальные материалы по профилю Исык-Куль – Балхаш. Можно утверждать, что эти работы стали для нее судьбоносными. Проработав после получения диплома почти 10 лет в Западной Сибири, сначала в гравиметрической партии Абаканской геофизической конторы (г. Абакан), а затем последовательно в должности старшего инженера, начальника партии и начальника отряда в Томской (г. Колпашево) и Новосибирской экспедициях, переехав в г. Киев, она вновь обратилась к глубинным сейсмическим зондированиям в качестве сотрудника Института геофизики АН УССР. Ее полевой опыт, профессионализм в камеральной обработке получаемых сейсмических материалов, умение работать с людьми, научные взгляды и приобретенная известность, особенно после издания в 1973 г. монографии "Волновые поля и модели земной коры (континентальная часть)", позволили Нинель Ивановне после переезда в г. Москву в Институт физики Земли (ИФЗ) без особых сложностей найти взаимодействие и войти в исследовательский процесс, реализуемый специалистами СРГЭ – ГЕОНа.

Руководителем, ответственным исполнителем камеральных работ и главным автором практически всех построенных за период 1972-1995 гг. глубинных разрезов в ГЕОНе является А.В. Егоркин. Под его руководством высокопрофессиональным коллективом сотрудников была реализована цифровая обработка аналоговых сейсмограмм ГСЗ, начиная от препроцессинга сейсмических записей, выделения на основе адаптивной скоростной фильтрации полезных волн и расчета пластовых скоростей по парным отражениям, до лучевого моделирования разрезов земной коры путем решения прямой задачи сейсморазведки. В результате создавались сейсмические разрезы земной коры, представленные в виде ассоциации блоков (доменов) с различными скоростями продольных и поперечных волн, разделенных субгоризонтальными, субвертикальными и наклонными границами. Завершались работы геологической интерпретацией геофизических неоднородностей, в последствие с привлечением данных сейсмоплотностного и магнитометрического моделирования, интерпретации магнитотеллурических данных и регионального теплового поля.

Нинель Ивановна, полагая, что разрезы земной коры, составленные в Центре ГЕОН являются слишком детальными за счет использования алгоритмов машинной обработки, выполнила переинтерпретацию ряда профилей (Метеорит, Кварц, Рубин и др.), на которых предпочтение отдавалось глубинным моделям в виде нескольких слоев со скачком скорости вдоль границ и

градиентным изменением скорости с глубиной. При этом, следует подчеркнуть, что новое представление разрезов не рассматривалось как альтернатива первичным построениям, выполненным под руководством А.В. Егоркина, а еще раз свидетельствовало, что вопросы обработки и интерпретации данных глубинных сейсмических исследований, включая природу волн и априорные модели строения земной коры, остаются предметом дискуссий, изучения и требуют разносторонних технологических подходов.

Проблемы обработки и интерпретации данных ГСЗ неоднократно поднимались и обсуждались «в рабочем порядке», на внутрироссийских совещаниях, в рамках международных конференций и программ (EAGE, Европроба и др.) и в публикациях. Несмотря на многочисленные дискуссии, Нинель Ивановна с большим уважением относилась к А.В. Егоркину и сотрудникам возглавляемого им коллектива. Она являлась рецензентом многих отчетов камеральной партии СРГЭ - ГЕОНа, соавтором совместных статей, в т.ч. в зарубежных журналах и, будучи участником многочисленных международных симпозиумов по глубинному строению, всегда ссылалась на авторов первичных данных и важность проводимых ими исследований.

Вышедшая в 2014 г. монография Н.И. и Г.А. Павленковой «Строение земной коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами» с благодарностью рассматривается нами как отражение многолетнего сотрудничества Нинель Ивановны и ее дочери со специалистами Центра ГЕОН и выдающееся развитие уникального метода изучения литосферы и глобальной геотектоники, обеспечивающих современное представление наук о Земле.

С.Л. Костюченко (ОО Росгео), В.А. Ракитов (Центр ГЕОН)

ЧАСТЬ I. ЛЕКЦИИ

ФРАГМЕНТИРОВАННОСТЬ (ДЕЛИМОСТЬ) ЗЕМНОЙ КОРЫ: СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЙ АСПЕКТ (В РАЗВИТИЕ ИДЕЙ АКАДЕМИКА М.В. САДОВСКОГО)

Леонов М. Г.¹

¹ – Геологический институт РАН, г. Москва, Россия; mgleonov@yandex.ru

Основой данной статьи является лекция, прочитанная на IX Всероссийской молодежной школе-семинаре «Современная тектонофизика. Методы и результаты» (Москва, ИФЗ РАН, 2025 г.). Лекция была представлена несколькими разделами: 1 – Введение; 2 – Размерность и формы структурно-тектонической делимости; 3 – Морфоструктурная делимость и осадочные бассейны; 4 – 4D делимость и области ареального (диффузного) рифтогенеза; 5 – Фрагментация горных масс и фрактальная геометрия; 6 – Структурно-геологические механизмы делимости; 7 – обобщение материала и выводы. Этого порядка изложения я и буду придерживаться в предлагаемой статье.

Явление фрагментации механизмов разрушения горных пород и стали предметом пристального внимания с середины XX века. В 1964 г. немецкий геолог Г. Штилле предложил использовать понятие «тектоника разрыхления» (нем. Lockertektonik) для описания инфраструктуры кристаллических пород фундамента европейских герцинид [Штилле, 1964], которое, однако, прошло практически незамеченным и было реанимировано только на рубеже XX-XXI веков в связи с изучением тектоники консолидированной коры [Леонов, 2008; Леонов и др., 2020; Леонов, Кочарян и др., 2020] и геологии дискретных сред [Ревуженко и др., 1997; Панин, 1998]. В 1982 г. американский математик и физик Бенуа Мандельброт [Mandelbrot, 1982] ввел в обиход понятия «фрактал» и «фрактальная геометрия», которые во многом изменили представления о сущности и методах анализа природных объектов, в частности, законов делимости (фрагментованности) горных масс.

Принципиально значимый вклад в разработку этого направления геомеханики внес советский и российский геофизик академик Михаил Александрович Садовский, создавший учение о блоковой делимости («кусковатости») пород и породных сообществ, слагающих земную кору [Садовский, 1979, 2004; Садовский и др., 1987; Садовский и др., 1988]. Идея «кусковатости» горных пород в сочетании с представлениями о фрактальной геометрии и тектонике разрыхления привели к фундаментальным результатам в области геомеханики и структурной геологии.

Ознакомиться с работами М.А. Садовского можно по публикациям (см. список литературы); суть представлений ученого заключена в следующем:

- Гранулометрический анализ горных пород, изучение размерности выкальываемых по разломам фрагментов, наблюдения за формами рельефа, анализ закономерностей дробления горных пород взрывом и другие признаки показали, что существуют «преимущественные» размеры отдельностей, возникающих при механической дезинтеграции горных пород и их сообществ, т.е. на существование «естественной кусковатости» горных пород (рис. 1).

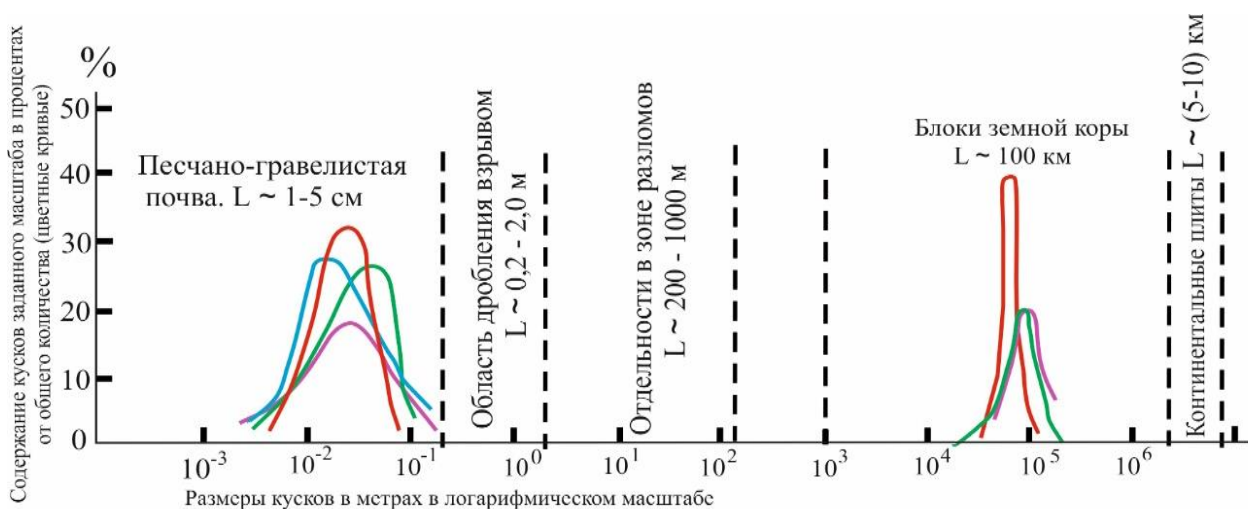


Рис. 1. Распределение величин природной отдельностей-кусков в зависимости от их размеров L (заимствовано из [Садовский, 1979])

- Преимущественные размеры «фрагментов» детерминированы, а размерность делимости иерархична от нано- до мегамасштабного уровня. Для горных пород установлена шкала кусковатости микро- и мезомасштаба с преимущественными размерами кусков $3\div 5$, $20\div 25$, $450\div 500$ мм. Размер крупноблоковой фрагментации горных масс в разных регионах (Тянь-Шань, Памир, Малая Азия, Калифорния) имеет, как выяснилось, сходный порядок: 80-110 км.

Идея кусковатости (структурно-тектонической делимости) оказала огромное влияние на различные аспекты геологии и смежных наук: тектонофизику [Гзовский, 1975; Гончаров и др., 2005] мезомеханику [Гольдин, 2002; Панин, 1998], механику разломов [Разломообразование ..., 1991; Кочарян, Спивак, 2003; Шерман, 2012; Кочарян, 2016], теорию и практику фрактальной геометрии [Гарагаш, 1982; Turcotte, 1997; Sergeev, 2016; Леонов, 2022].

Делимость земной коры находит отражение в особенностях рельефа, тектонической структуре, распределении геофизических полей и пр. [Кац и др., 1986]. Тектоническая делимость иерархична [Ажгирей, 1966] и имеет различную размерность от «нано» [Соболев и др., 2016] до «мега» масштаба [Мазарович, Соколов, 2004; Шерман, 2012] и свойственна как всей верхней оболочке Земли, так и ее отдельным сегментам, и структурам [Шерман, 2012; Леонов, 2022].

При этом установлены такие важные закономерности, как наличие постоянного шага между структурами одного ранга, что отражает некоторые общие закономерности деструкции земной коры [Чебаненко, 1977; Шерман, 2012; Леонов, 2022], а также незначительное влияние физико-механических и физико-химических свойств на распределение естественной кусковатости горных пород.

Парадигма «кусковатости» нашла подтверждение в обнаружении скрытой делимости горных пород – явления, имеющего большое значение для понимания механизма структурирования. Выяснилось, что кроме естественной кусковатости, которая находит отражение в тектонической структуре породных масс и в их механической дезинтеграции, существует так называемая «первичная кусковатость» (агрегативность, фрустумация [от лат. frustum-кусок]) или скрытая (латентная) текстура горных пород [Drits et al., 2005; Поваренных, 2008; Поваренных, Матвиенко, 2015].

Размеры и форма первичных «кусков-фрустумов» различаются. По данным [Поваренных, 2007], в мономинеральных породах (например, кварцитах, мраморах) в одном куске-фрустуме содержится: от 20 до 50 зерен (объем фрагмента $\sim 1-10$ см³) от 50 до 300 зерен (объем фрагмента $\sim 10-30$ см³). Самые крупные фрагменты-фрустумы зафиксированы в полиминеральных горных породах. В одном фрустуме, например, липарита может содержаться более 1000 минеральных зерен калиевого полевого шпата, кварца, альбита, слюды и акцессорных минералов. Отмечено, что морфология первичных кусков весьма прихотлива и потребует применения теории фракталов [Поваренных, 2008]. Д.С. Коржинский определил это явление как проявление локального мозаичного равновесия в неравновесной горно-породной среде.

Однако при решении задач региональной геологии явлению фрагментированности (делимости, дискретности) горных масс внимания уделяется явно недостаточно. Это касается как обучения студентов и аспирантов геологического профиля, так и практического отражения, и объяснения естественной делимости горных пород при структурно-геологических исследованиях, геокартировании и геисторических обобщениях. Мне показалось интересным и небесполезным обобщить известные к настоящему времени данные, касающиеся явления естественной структурно-тектонической делимости горнопородных масс, применительно к проблемам тектоники, полевой геологии и геодинамики. Организаторами IX Молодежной школы-семинара мне любезно была предоставлена возможность изложить результаты этого обобщения, за что я им искренне благодарен. Рассмотрим кратко основные положения проблемы, отраженные в лекции.

Структурно-тектоническая делимость (фрагментированность) горных пород – явление достаточно характерное для земной коры, что отчетливо проявлено, например, в системах линеаментов [Кац и др., 1986]. Проявлена механическая делимость в различных районах, структурах и породах и в разном масштабе (рис. 2, рис. 3).

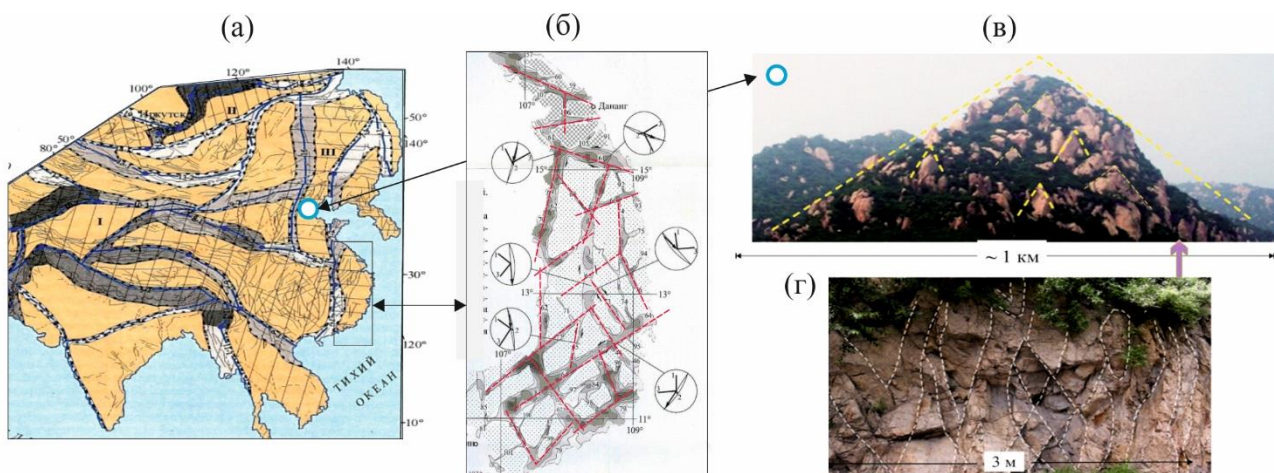


Рис. 2. Разномасштабная структурная делимость горных масс в пределах Юго-восточной Азии: (а), (б) – по [Актуальные вопросы ..., 2005] с изменениями; (в), (г) – личные наблюдения. Размерность: (а) – субглобальный уровень, (б) – региональный уровень (геологическая провинция), (в) – региональный уровень (крупная структура, горный массив), (г) – уровень обнажения (серии обнажений). (в) и (г) – граниты Яньшаньской гряды (J₃-K₁), Китай

Структурная делимость иерархична и в пределах одного района или структуры может быть выражена в разном масштабе и иметь различную природу (рис. 7), что необходимо учитывать при проведении геологических исследований.

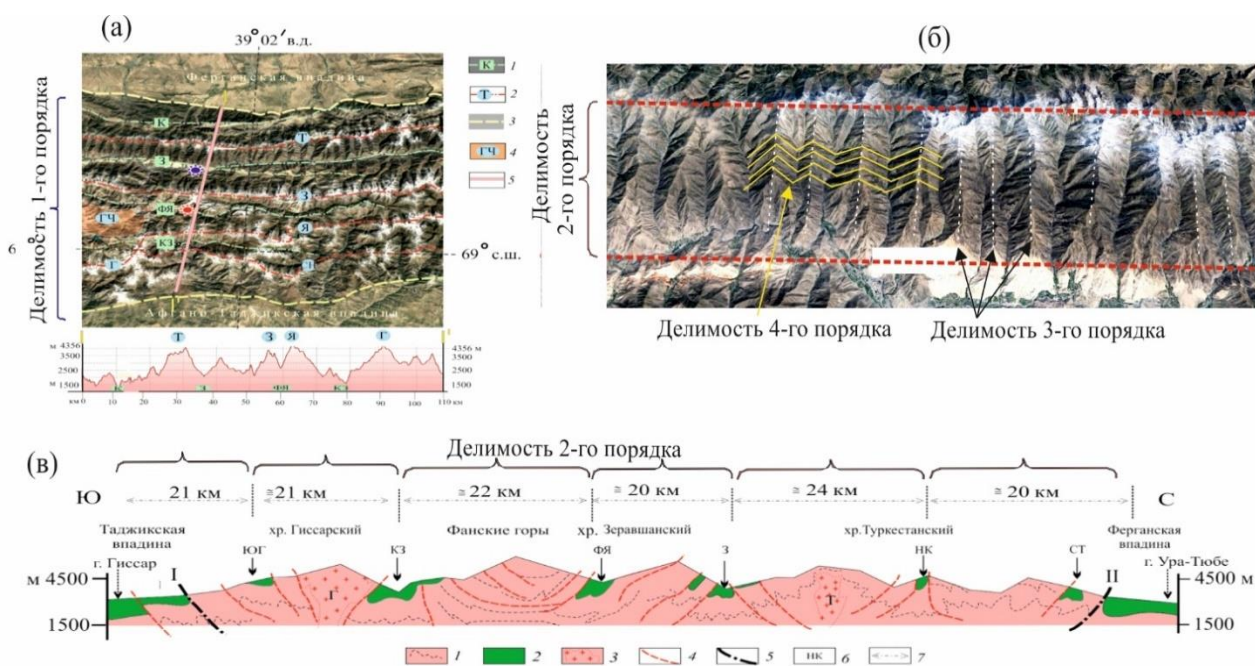


Рис. 3. Разномасштабная морфоструктурная делимость горных масс в пределах Гиссаро-Алая. (а) – Общий вид: 1 – осевые линии внутригорных депрессий-синклиналей; 2 – оси хребтов; 3 – границы Афгано-Таджикской и Ферганской межгорных впадин; 4 – Ганза-Чимтаргинский массив; 5 – линия морфоструктурного профиля. Буквы в квадратах – системы впадин: К – Нуратау-Курганакская, З – Зеравшанская, ФЯ – Фан-Ягнобская, КЗ – Каракуль-Зиддинская. Буквы в кружках – хребты: Т – Туркестанский, З – Зеравшанский, Г – Гиссарский, Я – Ягнобский, СН – Санги-Навишта; (б) – Южный склон Туркестанского хребта; (в) – Поперечный морфоструктурный профиль вдоль линии I-I

Исходя из общих соображений и фактических наблюдений, можно предполагать наличие следующих ведущих факторов, определяющих масштаб фрагментации. Делимость 1-го порядка (100-120 км) отражает свойства всего корового слоя и имеет геодинамическую природу; делимость 2-го порядка (~20 км) затрагивает лишь верхний гранитно-метаморфический слой и связана с поверхностной тектоникой. Делимость 3-го порядка (~2,5-4 км) определяется литологией отложений и (вероятно) фрактальными законами рельефообразования. Наконец, делимость 4-го порядка –

морфоструктурная, определяемая как лито- или петроструктурными особенностями горных пород, так и законами фрактальной геометрии. Существует делимость и более высокого порядка (макро-, мезо- и микро-масштабов) (рис. 2в, рис. 4), образующая сложную сетку выкальвываемых блоков.



Рис. 4. Фрагментация мезомасштаба в ордовикских гранитах Киргизского хребта (Тянь-Шань)

Характерной особенностью делимости является наличие постоянного шага между структурами одного ранга (рис. 7) что, по-видимому, отражает некоторые общие закономерности деструкции земной коры [Чебаненко, 1977; Шерман, 2012]. В частности, это явление четко проявлено в строении многих осадочных бассейнов [Леонов, 2022; Леонов и др., 2018], где отмечается внутренняя делимость (рис. 5), которая зачастую регламентирует расположение месторождений углеводородов и других полезных ископаемых [Леонов и др., 2018]. На рис. 5 приведена схема строения Мичиганского бассейна (Северная Америка). Центральносимметричная мегасинклиналь (бассейн) осложнена серией антиклинальных поднятий (черные пунктирные линии) и синклинальных прогибов второго порядка между осями однотипных структур порядка 30-50 км. В этом плане характерна и структура Онежской мульды (Балтийский щит) (рис. 5). Шаг делимости в различных бассейнах имеет сходный порядок размерности: Мичиганский бассейн – 30-50 км, Предкавказский передовой прогиб – 15-20 км, передовой прогиб Предрифа Сев. Африка – 15-17 км, Селенгино-Витимская зона – 20-50 км, Оршанская мульда – 25-50 км, Гиссаро-Алай – 20-25 км.

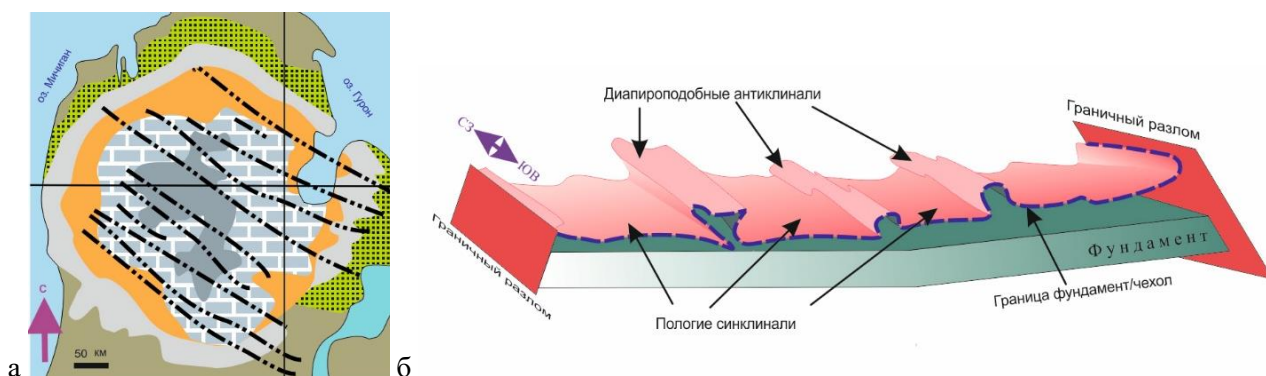


Рис. 5. Структурно-тектоническая делимость: (а) – Мичиганского бассейна; (б) – Онежской мульды [Леонов, 2020; Леонов и др., 2020]

Наличие в пределах бассейнов делимости более высокого ранга указывает на возможность трактовки подобного явления с позиций фрактальной геометрии, основа которой была заложена в работе [Mandelbrot, 1982]. Согласно Б. Мандельброту, «фракталом называется объект, состоящий из частей, которые в некотором смысле подобны целому» (цитата по [Федер, 2014], стр. 19). Фундаментальным свойством фракталов является делимость на самоподобные фрагменты и иерархичность структуры, т.е. ее повторяемость на разных масштабных уровнях, примером чего может служить сравнение широко известной пирамиды Коха, компьютерной модели горного массива (рис. 6) и реальной структуры природного объекта (рис. 2в).

Анализ осадочных бассейнов [Леонов, 2022] и приведенные выше примеры позволяют предположить, что геометрия внутриконтинентальных осадочных бассейнов и геометрия морфо- и

инфраструктуры их фундамента на любом масштабном уровне может быть описана в рамках законов фрактальной геометрии.

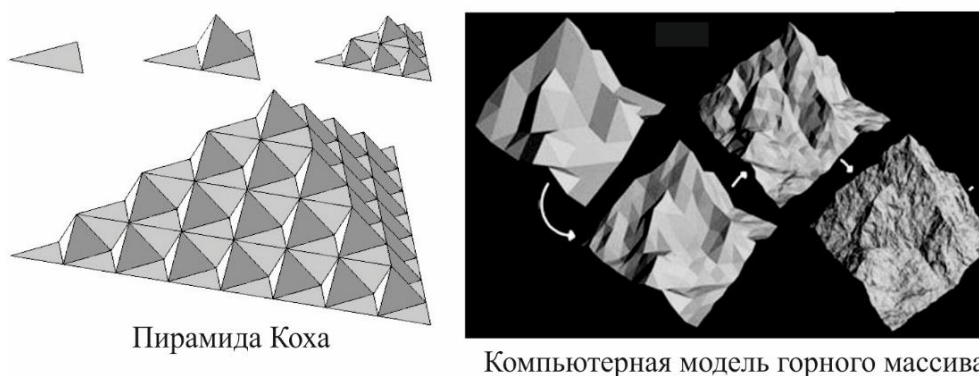


Рис. 6. Примеры фрактальных объектов

Этот вывод, кроме определенной самоценности, имеет и более фундаментальное значение в контексте изучения динамики геологических процессов. Допуская фрактальную природу морфоструктурной делимости осадочных бассейнов и их инфраструктуры на различных масштабных уровнях, мы избегаем необходимости искать причину процесса интрабассейновой дифференциации (делимости) во внешнем по отношению к бассейну силовом воздействии, что может менять многие тектонические и геодинамические построения.

Проблемы делимости горных пород как правило касаются трещинно-разломной тектоники, что, учитывая распространенность и выраженность разломов в структуре земной коры, вполне естественно. В то же время, даже беглый взгляд на морфоструктуру земной поверхности или на ее геологическое строение позволяет понять, что делимость определяется не только линейными структурами (разломами, линеаменами, зонами концентрированной деформации), но и существованием трехмерных геологических провинций, имеющих различное структурно-вещественное наполнение. Условно они были названы объемными 3D провинциями [Леонов, 2024]. Подобная разновидность делимости, характерная для океанической коры, как подчеркнуто в [Мазарович, Соколов, 2004], практически не исследована ни со стороны феноменологической, ни с позиций исторической геодинамики.

Такие провинции являются отражением не только трехмерной (3D) геометрии, но и определяют временной аспект формирования структуры земной коры, что полностью соответствует сущности геологических процессов, протекающих во времени, т.е. можно говорить о пространственно-временной 4D фрагментации.

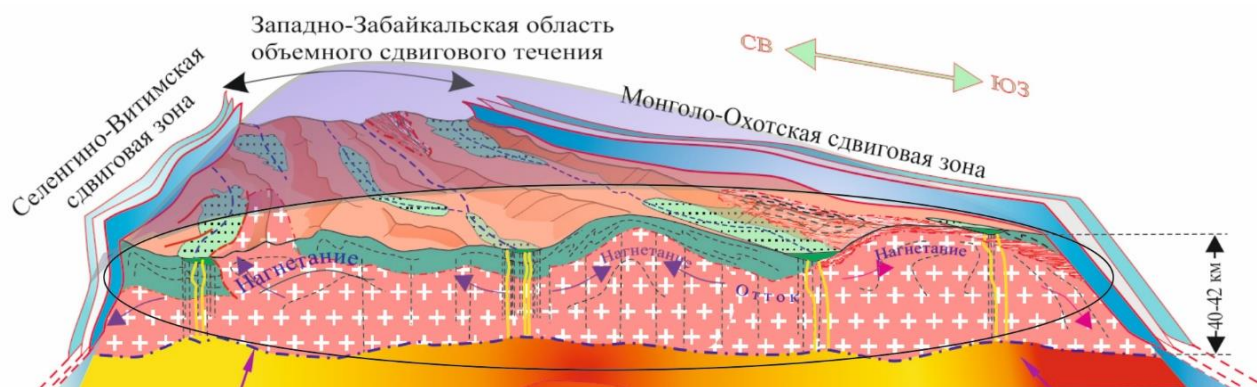


Рис. 7. Селенгино-Витимская провинция – может быть представлена как ограниченное в пространстве и во времени геологическое тело (элемент 4D объемной делимости)

Именно такая задача и стоит перед геологами – исследовать и отображать не только геометрические формы (т.е. быть замкнутым на структурном анализе), но изучать существование структур во времени, в также выявлять генетическую природу структур, на что было обращено внимание выше. «Без генетического подхода структурная геология вырождается в примитивное, формальное описание...» и геолог остается «...в неведении, какие интересные и тонкие, практически важные связи существуют между структурами... и геологической историей...» [Ажгирей, 1966, стр. 3].

Делимости такого рода в некоторой степени могут соответствовать понятия «структурно-формационная зона» или «террейн», но обсуждать вопросы понятийной базы в краткой статье возможности нет. Показательными объектами являются области ареального (рассредоточенного, диффузного) рифтинга [Борукаев, 1999], такие как Провинция бассейнов и хребтов (Северная Америка), Селенгино-Витимская зона (Западное Забайкалье) (рис. 7), Зондский шельф Южно-Китайского моря, описание которых приведено в [Леонов, 2022; Леонов, 2024].

Эта категория геоструктур представлена, кроме прочих, провинциями рассредоточенного (диффузного) рифтинга [Борукаев, 1999]. Их характеризует особый морфоструктурный парагенез [Балуев и др., 2012], а именно – упорядоченное чередование линейных бассейнов и комплементарных им хребтов. Образование провинций ареального рифтинга – явление глобальное и независимое от предыстории развития того или иного региона. И главное в контексте этой работы: провинции бассейнов и хребтов являются отражением фундаментального свойства горных масс – их делимости (фрагментированности), которой столь большое внимание уделял академик Михаил Александрович Садовский. Причем фрагментация земной коры осуществляется не только и не столько за счет возникновения систем разноразмерных жестких блоков, но и благодаря зарождению индивидуализированных в пространстве и во времени геоструктурных провинций. Изучение закономерностей и механизмов спорадического возникновения таких морфоструктурных ансамблей в пределах земной коры – задача будущего.

В заключение отметим, что структурно-тектоническая и морфоструктурная делимость характерна не только для континентальной коры – в коре океанов она проявлена особенно четко [Мазарович, Соколов, 2004], но это вопрос иного исследования, как и анализ результатов численного и тектонофизического моделирования, которые показывают как саму возможность естественной фрагментации твердотельных субстанций, так и приоткрывают многие особенности и параметры этого процесса [Стефанов, 2002; Леонов и др., 2020].

Исследование выполнено по Теме НИР Геологического института РАН.

Литература

1. *Ажгирей Г.Д.* Структурная геология. – М.: МГУ. 1966. 364 с.
2. Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии. – Новосибирск: СО РАН. 2005. 298 с.
3. *Балуев А.С., Журавлев В.А., Терехов Е.Н., Пржиялговский Е.С.* Тектоника Белого моря и прилегающих территорий – М.: ГЕОС. 2012. 104 с.
4. *Борукаев Ч.Б.* Словарь-справочник по современной тектонической терминологии. – Новосибирск: СО РАН, НИЦ ОИГГМ. 1999. 69 с.
5. *Вадковский В.Н., Соколов С.Д., Захаров В.С., Лубнина Н.В.* Аккреционная тектоника и фрактальная размерность // Геофизика XXI столетия: 2002 год. Сборник трудов Четвертых геофизических чтений им В.В. Федынского. – М.: Научный мир. 2003. С. 278–285.
6. *Гарагаш И.А.* Образование ячеистых структур в упругопластической среде с внутренним трением и дилатансией // Доклады АН СССР. 1982. Т.266. №1. С. 59–63.
7. *Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. – М.: Наука. 1975. 536 с.
8. *Гольдин С.В.* Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // Физическая мезомеханика. 2002. Т.5. №5. С. 5–22.
9. *Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С.* Введение в тектонофизику. – М.: КДУ. 2005. 496 с.
10. *Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф.* Основы линеamentной тектоники. – М.: Недра. 1986. 140 с.
11. *Кочарян Г.Г.* Геомеханика разломов. – М.: ГЕОС. 2016. 424 с.
12. *Кочарян Г.Г., Спивак А.А.* Динамика деформирования блочных массивов горных пород. – М.: Академкнига. 2003. 424 с.
13. *Леонов М.Г.* Тектоника консолидированной коры. – М.: Наука. 2008. 478 с.
14. *Леонов М.Г.* Осадочные бассейны и фрактальная геометрия – опыт совместного анализа // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). 2022. Вып.20. С. 17–171.
15. *Леонов М.Г.* Структурно-тектоническая делимость земной коры и ее отражение в областях диффузного рифтинга // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т.16. №3. С. 74–91.

16. *Леонов М.Г., Морозов Ю.А., Пржиялговский Е.С., Рыбин А.К., Бакеев Р.А., Лаврушина Е.В., Стефанов Ю.П.* Тектоническая эволюция системы “фундамент–чехол” и морфоструктурная дифференциация осадочных бассейнов // *Геотектоника*. 2020. №2. С. 1–29.
17. *Леонов М. Г.* Морфоструктура внутриконтинентальных осадочных бассейнов и фрактальная геометрия // *Динамические процессы в геосферах*. 2022. Т.14. №1. С. 3–16.
18. *Леонов М.Г., Пржиялговский Е.С., Лаврушина Е.В.* Граниты. Постмагматическая тектоника и углеводородный потенциал. – М.: ГЕОС. 2018. 332 с.
19. *Леонов М.Г., Кочарян Г.Г., Ревуженко А.Ф., Лавриков С.В.* Тектоника разрыхления: геологические данные и физика процесса // *Геодинамика и Тектонофизика*. 2020. Т.11. №3. С. 491–521.
20. *Мазарович А.О., Соколов С.Ю.* Анизотропия внутриплитных деформаций Атлантического океана // *Современные проблемы геологии*. – М.: Наука. 2004. С. 223–250.
21. *Опарин В.Н., Танайно А.С.* Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. – Новосибирск: Наука. 2011. 258 с.
22. *Панин В.Е.* Основы физической мезомеханики // *Физ. мезомех.* 1998. Т.1. №1. С. 5–22.
23. *Поваренных М.Ю.* Об установлении нового свойства горных пород – скрытой текстуры // *ДАН*. 2008. Т.419. №2. С. 233–236.
24. *Поваренных М.Ю., Матвиенко Е.Н.* Новое макроскопическое свойство горных пород – фрустумация – как проявление квантования-кусковатости горнопородного уровня пространственно-временного континуума // *Пространство и время*. 2015. №1-2. С. 19–20.
25. *Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига*. – Новосибирск: Наука. 1991. 262 с.
26. *Ревуженко А.Ф., Бобряков, А.П., Косых В.П.* О течении сыпучей среды с возможным неограниченным скольжением по поверхностям локализации // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1997. №3. С. 37–42.
27. *Садовский М.А.* Естественная кусковатость горной породы. Докл. АН СССР. 1979. Т.247. №4. С. 829–831.
28. *Садовский М.А.* Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. – М.: Наука. 2004. 440 с.
29. *Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука. 1987. 101 с.
30. *Садовский М.А., Кочарян Г.Г., Родионов В.Н.* О механике блочного горного массива // Докл. АН СССР. 1988. Т.302. №2. С. 306–307.
31. *Соболев Г.А., Веттегрень В.И., Киреевкова С.М., Кулик В.Б., Мамалимов Р.И., Морозов Ю.А., Смольская А.И., Щербаков И.П.* Нанокристаллы в горных породах. – М.: ГЕОС. 2016. 102 с.
32. *Стефанов Ю.П.* Локализация деформации и разрушение в геоматериалах. Численное моделирование // *Физическая мезомеханика*. 2002. Т.5. №5. С. 107–118.
33. *Федер Е.* Фракталы. Перевод с англ. – УРСС: ЛЕНАНД. 2014. 264 с.
34. *Чебаненко И.И.* Теоретические аспекты тектонической делимости земной коры. – Киев: Наук. думка». 1977. 83 с.
35. *Шерман С.Й.* Деструкция литосферы: разломно-блоковая делимость и ее тектонические закономерности // *Геодинамика и тектонофизика*. 2012. Т.3(4). С. 315–344.
36. *Штилле Г.* Избранные труды. – М.: Мир. 1964. 887 с.
37. *Drits V.A., McCarty D.K., Sakharov B., Milliken K.L.* *Canad. Miner.* 2005. Vol.43. P. 1255–1290.
38. *Mandelbrot B.B.* *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman, New York. 1982. 468 p.
39. *Sergeev S.* GIS-Practical Experience in the Boundaries Definition of the Platform Deep Crustal Blocks on the Studying of the Earth's Surface Fractal Divisibility: Example of the White Sea-Kuloi Plateau // *Journal of Geodesy and Geomatics Engineering*. 2016. Vol.3. P. 19–24.
40. *Turcotte D.L.* *Fractals and chaos in geology and geophysics* // Cambridge: University Press. 1997. 398 p.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И РОЛЬ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Ребецкий Ю. Л.¹

¹ – *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; reb@ifz.ru*

Введение. Ю.А. Билибин разрабатывал свою рудогенетическую концепцию генезиса плутоногенного золотого оруденения на примере Яно-Колымской провинции (ЯКП). Эта концепция была основана на двух главных положениях [Билибин, 1959, 1961а, б]:

I. о постоянной структурной приуроченности гидротермального золотого оруденения к масштабным свитам даек, преимущественно среднего состава, интерпретируемая как генетическая связь руд с глубинным очагом (и парагенетическая – с дайками) диоритовых магм, формирующихся на начальных и средних этапах развития подвижных зон;

II. о догранитном геологическом возрасте не только диоритов, но и связанного с ними оруденения, отождествлявшимися с батолитами последующего периода главной складчатости в Яно-Колымской области.

Другие исследователи [Гельман, 1976; Горячев, 1997, 2003; Гамянин и др., 2003; Ворошин, 2005 и др.] на основе комплексных металлогенических и минералого-генетических исследований рудоносных структур Южно-Верхоянского, Чукотского, Северного, Яно-Колымского и некоторых других золото-кварцевых мегапоисов и ведущих золоторудных месторождений сформулировали и обосновывали иную металлогеническую концепцию происхождения золотого оруденения в связи с формированием региональных гранитно-метаморфических куполов (валов) и гранитоидных рудно-магматических систем орогенного класса. Показано, что рудоносному флюиду свойственна мантийная природа. Этот вывод сделан на основании анализа процессов региональной карбонатизации, баланса углерода и сероводородного флюида в объеме пород рудоносных структур.

На сегодняшний день не существует общепринятой полной истории развития Верхоянского складчато-надвигового (ВСНП) и Яно-Колымского поясов (ЯКП). Яно-Колымский мегапоис состоит из одноименного и Приколымского (Шаманихо-Столбовского) золото-кварцевых поясов. Он маркирует долгоживущую коллизионную зону взаимодействия Верхоянской пассивной окраины, Охотского кратонного террейна и Индигиро-Омолонского супертеррейна.

Рудная золотоносность ВСНП и ЯКП локализуется в узких протяженных зонах – поясах, тяготеющих к региональным разломам сдвиговой и надвиговой природы. Эти пояса формировались на пассивной окраине Сибирской платформы–континента, образованной терригенными песчано-сланцевыми отложениями палеозоя – мезозоя, испытавшими региональный метаморфизм невысокой интенсивности. Метаморфизованные породы тесно ассоциируют с гранитоидными телами, формируя ареалы так называемого регионально-плутонического метаморфизма [Гельман и др., 1980; Крутоус, 1992].

В настоящее время концепция взаимосвязи формирования месторождения благородных металлов на северо-востоке Азии с происходившими здесь субдукционными процессами считается общепринятой [Романюк, Ткачев, 2010].

О некоторых тектонофизических проблемах генезиса месторождений благородных металлов. При обобщении всего вышеприведенного материала по условиям формирования месторождений таких благородных металлов, как золото, платина, серебро следует отметить, что современные исследования содержания золота в осадочных, вулканических, интрузивных породах и мантийных включениях Южного Тянь-Шаня и Памира показали очень низкую его концентрацию – первые мкг/т. Наибольшее содержание золота наблюдается в интрузивных породах несколько выше по сравнению с вулканогенно-осадочными – соответственно 3.5 и 2.4 мкг/т. Среднее содержание Au в земной коре Памиро-Тянь-Шаня составляет 3.3-3.5 мкг/т, в верхней мантии 3.5-3.7 мкг/т, что соответствует наиболее часто встречающимся концентрациям этого металла в складчатых и платформенных структурах других регионов Земли [Гавриленко, Минаев, 2003].

Таким образом, при создании модели, объясняющей механизм формирования месторождений благородных металлов, необходимо учитывать вопрос повышения их концентрации. Механизм, который может обеспечить это, должен быть связан с мантийными сульфидами, образующимися при гидратации океанической литосферы и насыщающимися химическими элементами. Концентрации этих сульфидов может происходить на этапах формирования подкоровых и внутрикоровых

магматических очагов из-за изменения напряженного состояния в коре, создающего препятствие в продвижении магмы к поверхности.

Приведенные выше работы по исследованию структур и состояния коры в зонах золоторудных месторождений позволяют выделить несколько факторов, которые можно рассматривать как прогностические: 1) островная дуга или активная окраина континента, наращиваемая за счет аккрецирования террейнов и блоков в процессе субдукции; 2) дайки и интрузии с диоритовыми магмами; 3) фиксируемая последовательная смена режимов напряженного состояния от горизонтального растяжения к горизонтальному сдвигу и далее к горизонтальному сжатию с наличием в разрезе структур разрушения и разломов в виде сбросов, взбросов и сдвигов; 4) купольные структуры, в ядрах которых наблюдается метаморфизм амфиболитовой фации; 5) наличие верхнекорового магматического очага диоритовых магм; 6) гранитоидный магматизм, 7) наличие мантийных флюидов.

Проблема прогноза мест возможного расположения золоторудных месторождений в рамках такого набора факторов требует создания некоторой модели, которая бы связывала и объясняла последовательность их чередования. Ключевыми в решении поставленной проблемы являются ответы на вопросы: (1) что является источником золота; (2) какой геодинамический процесс играет определяющую роль в формировании вертикальной проницаемости коры; (3) чем обусловлена неоднородность формирования месторождений в пространстве; (4) что определяет формирование магматических внутрикоровых очагов диоритовых магм в верхней части коры; (5) почему гидротермальные процессы формирования месторождений золота начали действовать вслед за началом гранитизации коры; (6) в чем заключается роль мантийных флюидов при формировании месторождений.

Большая часть ответов на сформулированные выше вопросы лежит в правильном понимании механизма субдукции литосферной океанической плиты и в механизме генерации напряжений горизонтального сжатия в коре континентального склона. Многолетний опыт тектонофизических исследований напряженного состояния зон субдукции и поиск альтернативных общепринятому объяснений генезиса горизонтального сжатия в этой зоне позволил выбрать механизм ролл-бэк субдукции и магматизацию коры как два основных фактора (динамо пару), отвечающую за периодическую смену (первые тысячи лет) режимов напряженного состояния в коре активной континентальной окраины.

Эволюция тектонических палеонапряжений в континентальной коре Севера Востока Азии. Формирование транскоровых и верхнекоровых приповерхностных сбросов на восточной окраине Сибирского кратона происходило на пассивной ее стадии в режиме напряженного состояния горизонтального растяжения (рис. 1а). На начальной стадии формирования субдукции, в момент слома и погружения тяжелой океанической литосферы, эти сбросы обновились (рис. 1б).

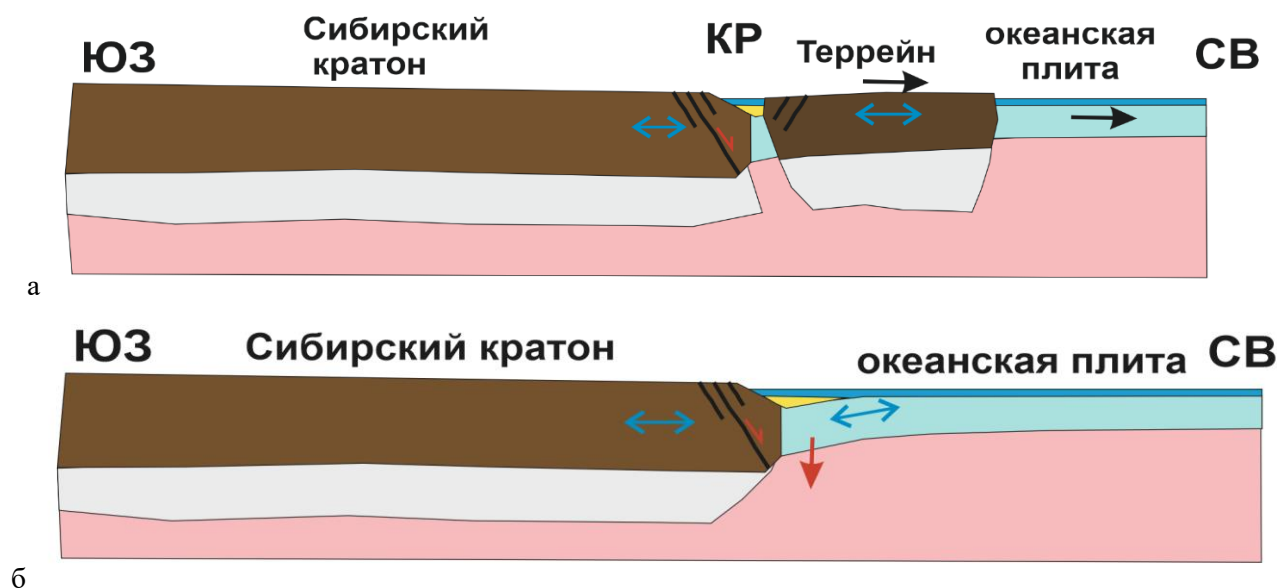


Рис. 1. Тектонофизическая схема напряженного состояния пассивной континентальной окраины – Сибирский кратон на стадии рифтогенеза (а) и при переходе к субдукционной стадии (б)

На основной стадии наращивания Сибирского кратона на восток и северо-восток в мантию начинает поступать насыщенная водой океаническая литосфера. На ее кровле не происходит реакция дегидратации, и в мантию поступает обогащенный веществом водный флюид.

Согласно работам [Omori et al., 2002, 2004, 2009; Maruyama et al., 2009] на глубине 100 км в мантии под островной дугой происходит образование амфиболов при участии воды и непосредственно над ней формируется вулканический фронт. Наличие второй колонны плавления над слэбом океанической коры на глубине 200 км не было доказано данными высокоразрешающей томографии [Hasegawa et al. 1978, 1994], т.к. распознать колонну водонасыщенных пород прямо под вулканическим фронтом трудно. В работе [Sillitoe, Hedenquist, 2003] показано, что реакция дегидратации (переход голубого сланца в эклогит) происходит на глубинах от 50 до 150 км (рис. 2).

В результате в мантии формируется наклонный восходящий слой гидратированного перидотита, доставляющий водный флюид к подошве литосферы. Здесь происходит частичное плавление, образуется мантийная магма (толеитовые базальты), формирующая малые мантийные плюмы.

Важно отметить, что именно водные флюиды являются причиной постепенного формирования у подошвы литосферы малых мантийных плюмов, и поэтому водный флюид первым проникает в континентальную литосферу. С другой стороны, считается, что объем мантийной магмы, скапливающейся у основания литосферы, обеспечивает значительный приток тепловой энергии, которая высвобождается при фракционировании магмы в более развитые и богатые летучими веществами элементы [Sillitoe, Hedenquist, 2003].

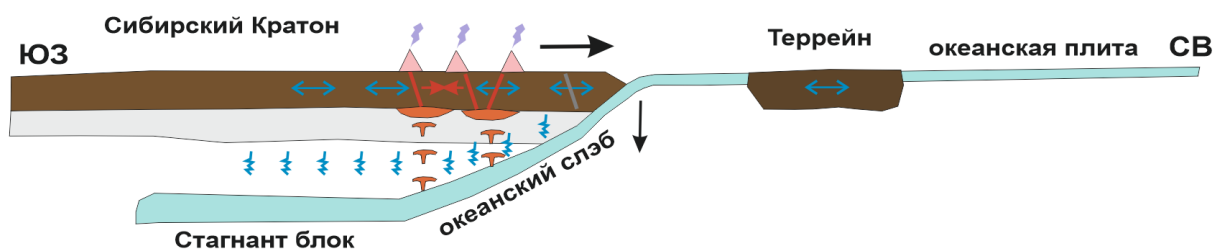


Рис. 2. Тектонофизическая схема напряженного состояния Сибирского кратона на продвинутой стадии субдукции океанической плиты

Попадая в литосферу, водный флюид меняет условия плавления и в ней начинают происходить выплавки базальтов. Следуя идеям Н.Боуэн [Петрографический словарь, 1981], полагаем, что кристаллизация базальтовой магмы происходит непрерывным обогащением расплава кремнием, натрием, калием и др. легкоплавкими компонентами, и граниты являются последними дифференциатами базальтовых расплавов. В этот момент в коре пока еще существует режим напряженного состояния пассивной континентальной окраины, т.е. горизонтальное растяжение. Это благоприятные условия для проникновения гранитной магмы в кору по зонам трансформных разломов (сбросов), расположенных параллельно оси океанического желоба. За счет высокого давления магма (большого, чем напряжения горизонтального сжатия) раздвигает стенки разлома и существенно расширяет область повышенной проницаемости коры за счет создаваемых дайкой подобных ответвлений.

На начальной стадии гранитизации коры магма изливается на поверхность (это могут быть подводные излияния) в виде вулканов или по трещинам в зависимости от ее давления в подкоровом магматическом очаге. Движение магмы по разлому было обеспечено высоким уровнем ее давления (давление магмы в подкоровом очаге минус вес столба магмы на данной глубине), превышающем уровень горизонтального сжатия в коре. Ниже фронта магмы ее давление всегда больше литостатического давления пород на данной глубине и снижается до литостатики после излияния магмы на поверхности либо остается большим литостатики при вулканической форме излияний. В результате после первых таких излияний в самой коре вблизи трансформных разломов возникают локальные участки повышенного уровня горизонтального сжатия, превышающего литостатику. Это приводит к изменению здесь геодинамического типа напряженного состояния на горизонтальный сдвиг, а в ближней к разломам зоне возможно формирование горизонтального сжатия [Ребецкий, Стефанов, 2022; Ребецкий, 2023].

Таким образом, на стенках разломов постепенно возникает высокий уровень сжатия и новые порции магмы уже не способны пройти через трансоровый разлом из-за высокого уровня напряжений горизонтального сжатия. Магма находит новые разломы и зоны повышенной проницаемости, находящиеся в стороне от предыдущих этапов магматизации коры, для проникновения вверх и дальнейшей гранитизации коры. На завершающей фазе повышения уровня напряжений горизонтального сжатия вулканические ареалы линейного типа сменяются на вулканы центрального типа [Куйбида, 2019], которые позволяют продолжаться процессам вулканизма в условиях режима горизонтального сдвига или даже сжатия.

По мере обогащения водным флюидом литосферы гранитизация коры начинает охватывать все большие площади и в результате формирования гранитного батолита вся зона формирующегося орогена переходит в режим горизонтального сжатия или его сочетание с горизонтальным сдвигом.

Здесь важно отметить, что не давление со стороны зоны столкновения литосферных плит определяет повышение уровня горизонтального сжатия. Согласно результатам тектонофизической реконструкции, напряжений такого давления нет ни в зоне океанского спрединга, ни на участке литосферы океанского склона зоны субдукции [Ребецкий, Полец, 2021; Ребецкий, 2023]. Источником сил субдукции океанической литосферы является сила тяжести как на стадии ее слома, так и на стадии скольжения по мантийному склону. В реальности дополнительное сжатие связано с описанным выше механизмом проникновения в кору магмы. В результате действия этого механизма процесс магматизации континентальной коры приводит к возникновению в ней пятен интенсивного горизонтального сжатия, которые окружены массивом, находящимся в условиях напряженного состояния горизонтального сдвига или даже растяжения (реликтовое).

Если следовать работам [Маруяма 2018 и др.], то создание условий для проникновения магмы в кору следует связывать с механизмом ролл-бэк субдукции. Весь период субдуцирования океанической плиты, согласно этим работам, можно разделить на два этапа:

1) аккреционный, при котором скорость субдукции минимальная из-за высокого уровня сил трения на контакте океанической и континентальной литосфер. На этой фазе процесса субдукции идет накопление осадков в зоне океанского желоба. В этот момент в коре орогена возникает небольшое дополнительное горизонтальное сжатие, которое, однако не способно сменить геодинамический режим напряженного состояния (рис. 3а);

2) эродирующий, когда под действием веса аккреционной призмы океанская литосфера прогибается и между ней и островной дугой / континентом возникает зона декомпрессии (рис. 3б). В эту зону поступают осадки и начинают играть роль смазки, понижающей силы трения. Скорость субдукции резко возрастает за счет набегания островной дуги / континента на океаническую плиту, смещая ось желоба.

В момент эродирующей стадии субдукции в коре орогена возникают дополнительные деформации горизонтального удлинения в направлении на океанский желоб, что постепенно уменьшает горизонтальное сжатие. Деформации горизонтального удлинения распределяются в континентальной коре неравномерно, концентрируясь в ослабленных зонах (зоны разломов). Здесь может происходить смена геодинамического режима на горизонтальное растяжение.

Таким образом, сочетание особенностей развития субдукционного процесса в виде ролл-бэк механизма и гранитной магматизации континентальной коры на эродирующей его стадии являются той динамо парой, которая определяет периодическую смену геодинамических обстановок сжатия и растяжения. Именно эта динамо пара является, с одной стороны, источником проникновения периодического поступления граничной и высокотемпературной мантийной магмы в кору.

Длительность действия этих двух этапов определяется скоростью формирования мощной аккреционной призмы и скоростью ее разрушения на эродирующем этапе. Согласно современным данным [Мураками 2018 и др.,] для тихоокеанских зон субдукции около 75% ее протяженности отвечает эродирующей стадии, характеризующейся высокими скоростями конвергенции плит. Если предположить, что данное соотношение выдерживается на геологических временах (десятки и сотни млн. лет), то это означает, что скорость накопления аккреционной призмы в три раза выше скорости ее полного разрушения. Для относительно стандартной мощности аккреционной призмы в 3-5 км время ее формирования может составлять 3-5 млн. лет. Это означает, что для одного участка зоны субдукции время действия режима сжатия в континентальной коре может составлять 10-15 млн. лет. Таким образом, для литосферных плит в первые тысячи километров, закрытие которых происходит за 100-150 млн. лет, имеет место более 10-15 смен этапов растяжения и сжатия коры.

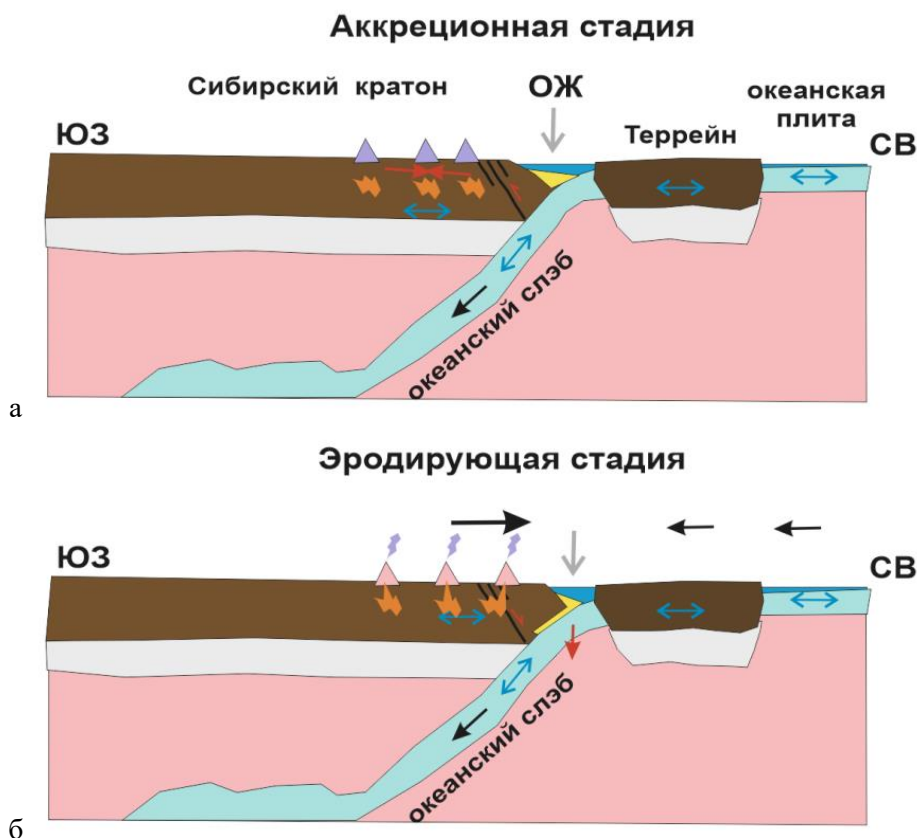


Рис. 3. Тектонофизическая схема напряженного состояния Сибирского кратона на продвинутой стадии субдукции океанической плиты: (а) – аккреционная стадия с низкой скоростью пододвигания океанической плиты, в ходе которой период в нижней части коры действует реликтовый режим горизонтального растяжения, а в верхней горизонтальное сжатия, вызванное магматизацией коры; (б) – эродирующая стадия с высокой скоростью субдукции, вызванной в большей степени надвиганием континентальной плиты на океаническую, в ходе которой в большей части верхней коры или в локальных ее участках возникает режим горизонтального растяжения

Механизм формирования порфировых структур золоторудных месторождений. В момент поступления в литосферу малых мантийных плюмов в ней уже интенсивно шли выплавки гранитов и базальтов. Более легкие магмы ушли вверх к подошве коры, а более тяжелые фракции опустились к подошве. При этом в подкоровой литосфере, где происходило формирование гранитных и базальтовых магм, режим напряженного состояния остался прежним – горизонтальное растяжение. Поскольку плавление базальтов в нижней части литосферы происходило из-за поступления сюда водных флюидов, то температура литосферы изменялась не сильно.

На эродирующей стадии субдукции (длительность 10-15 млн. лет), когда происходит понижение уровня горизонтального сжатия и могут возникнуть зоны локального горизонтального растяжения (длительность первые млн. лет), идет быстрый подъем мантийной магмы от подошвы коры по транскоровым разломам вверх. В этот период ее давление способно преодолеть силы сжатия от понизившегося уровня горизонтальных напряжений. Как показывают расчеты, при магматизации коры наиболее высокий уровень напряжений горизонтального сжатия имеет место в верхней 10-15 км мощности коры. Поэтому мантийная магма не может сразу подняться до кровли коры. Она формирует промежуточные магматические очаги на глубинах 5-15 км – будущие источники диоритовой магмы. Это приводит к возникновению в верхних горизонтах коры антиклиналей складок над верхнекоровыми магматическими очагами. Эти очаги и следует рассматривать как источник формирования будущих месторождений уже в верхних горизонтах коры (1-5 км).

Высокотемпературные мантийные магмы, поступающие в подкоровую часть литосферы уже после начала гранитизации, продвигаясь к подошве коры, дробят и частично расплавляют ее материалы. В условиях уже сформированного в коре режима горизонтального сжатия андезитовые магмы уже не могут создать линейные магматические излияния и поднимаются на поверхность в виде стратовулканов. В тех случаях, когда напряжения сжатия в верхней части коры не очень интенсивные или даже когда имеет место режим горизонтального растяжения, мантийные магмы доходят до поверхности и не образуют порфировых систем. Они в процессе дальнейших геологических

процессов могут полностью эродировать. В тех случаях, когда в верхней части коры действует интенсивный режим горизонтального сжатия, мантийная магма создает в коре промежуточный высокотемпературный магматический очаг – будущие порфировые и эпитермальные системы.

В работе [Коробейников 2007] подчеркивалась роль глубинных магм и мантийных высоконагретых флюидов. Крупные рудные месторождения формировались при совмещении внутрикоровых и глубинномантийных рудообразующих магмотермофлюидодинамических пород.

В период остановки продвижения мантийной магмы (аккреционный этап длительностью 3-5 млн. лет) водный флюид, обогащенный мантийными элементами, проникает во верхнекоровые промежуточные магматические камеры. Здесь идут специфические химические реакции и создаются химические коагулянты с благородными металлами, которые в дальнейшем будут способствовать их осаждению в коллекторы внутри разломных зон. На очередном эродирующем этапе происходит выброс обогащенной магмы к поверхности коры на глубины 1-5 км.

Водный флюид создает условия для развития процесса гранитизации коры, а мантийный флюид, насыщенный сульфидами, поступает в кору позднее начала гранитной ее магматизации. Этап флюидизации верхней части коры, который имеет место на финальной стадии ее гранитизации, является главным этапом формирования порфировых структур и месторождений благородных металлов в островных дугах и на активных континентальных окраинах. Цикличность формирования в верхних горизонтах коры напряженного состояния горизонтального сжатия (повсеместное) и локальных участков горизонтального растяжения является главным фактором формирования порфировых систем.

Выводы. Формирование порфировых систем с высоким содержанием руд благородных металлов в коре активных континентальных окраин происходит в условиях периодической смены режимов напряженного состояния горизонтального растяжения на горизонтальный сдвиг или сжатие. Повышение в них концентрации благородных металлов происходит в большей степени на стадии формирования промежуточного мантийного магматического очага на глубинах 10-15 км за счет сульфидных флюидов, поступающих от кровли океанического слэба, погружающегося в верхнюю мантию.

Важную роль в формировании условий появления таких верхнекоровых магматических очагов играют водные флюиды, также идущие от кровли мантийного слэба, которые не только способствуют возникновению в мантийном клине малых мантийных плюмов, но и запускают процесс выплавления базальтов и гранитов в подкоровой литосфере, когда поступают в нее.

Гранитные магмы, проникающие в кору по транскоровым разломам, расклинивают их и повышают уровень горизонтального сжатия в верхней части коры до надлитостатических значений. В результате гранитной магматизации коры в ней формируется режим горизонтального сдвига или сжатия, который и является причиной создания в верхней коре промежуточных очагов мантийной магмы.

Механизм накатывания континентальной коры на ось океанского желоба в зоне субдукции создает в коре локальные условия растяжения, которые и позволяют мантийной магме из верхнекоровых очагов, уже прошедшей насыщение сульфидными растворами, подняться к поверхности и создать здесь порфировые системы с повышенной концентрацией руд благородных металлов.

Таким образом, механизм ролл-бэк субдукции в ходе этапа создания аккреционной призмы, характеризующегося медленными скоростями субдукции, эродирующего этапа ускоренной субдукции и накатывания на ось желоба океанической коры, периодически создает в континентальной коре условия для формирования в верхней коре горизонтального сжатия или сдвига и локального (не повсеместного) горизонтального растяжения.

Геологические данные подтверждают главные выводы, сделанные выше. Они показывают, что крупные золоторудные и комплексные золотоплатиноидные рудные поля и места их заложений локализованы в блоках с неоднократным проявлением глубинного и внутрикорового магматизма и метасоматизма [Глухманчук, 1992]. По терминологии Е.Д. Глухманчука, “энергетической основой глубинной тектоники и метасоматизма могли служить периодически повторяющиеся деформации и их упругие последствия. Крупность возникавших рудных объектов обеспечивалась размерами исходных структур ловушек, а также солитонно импульсным режимом неоднократной глубинной дегазации”. Крупные рудные месторождения возникали благодаря многократным длительным процессам «стягивания» рудного вещества в единые геохимические ореолы поля [Коробейников 2007].

Работа выполнена в рамках исследований лаборатории тектонофизики внутриконтинентальных орогенов и, в частности, напряженного состояния коры Крыма и его сопредельных территорий, проводимых по Госзаданию ИФЗ РАН.

Литература

1. Билибин Ю.А. К вопросу о локализации месторождений золота // Избр. тр. М.: Изд-во АН СССР 1961а. №3. С. 135-148.
2. Билибин Ю.А. Диоритовые магмы как первоисточник золотого оруденения // Избр. тр. М.: Изд-во АН СССР. 1961б. Т.3. С. 149-165.
3. Билибин Ю.А. Общие вопросы металлогении золота // Избр. тр. М.: Изд-во АН СССР 1959. Т.2. С. 238-339.
4. Ворошин С.В. Метаморфогенное золото-кварцевое оруденение Верхне-Колымского региона и оценка его продуктивности методами ГИС: Дис. ... док-ра геол.-минер. наук. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН. 2005. 323 с.
5. Гавриленко Б.В.; Минаев В.Е. Золото в разрезе земной коры и верхней мантии Таджикистана // Геохимия. 2003. №10. С. 1069-1083.
6. Гамянин Г.Н., Горячев Н.А., Бортников Н.С., Аникина Е.Ю. Типы серебряного оруденения Верхояно-Колымских мезозойд (геология, минералогия, генезис, металлогения) // Тихоокеанская геология. 2003. Т.22. №6. С. 113-126.
7. Гельман М.Л. О роли регионального метаморфизма в золотом оруденении Северо-Востока СССР // Докл. АН СССР. 1976. Т.230. №6. С. 1406-1409.
8. Гельман М.Л., Березнер О.С., Крутоус М.П. и др. Картирование малоглубинных метаморфических комплексов в рудных районах Северо-Востока СССР // Методика картирования метаморфических комплексов. Новосибирск: Наука. 1980. С. 136-149.
9. Глухманчук Е.Д. Деформации упругого последействия в верхних слоях земной коры как индикатор движения магм и флюидов // Геология и геофизика. 1992. №6. С. 32-36.
10. Горячев Н.А. Золотое оруденение и гранитно-метаморфические купола складчатых поясов фанерозоя // Магматизм и оруденение Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН. 1997. С. 258-273.
11. Горячев Н.А. Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН. 2003. 143 с.
12. Коробейников А.Ф. Мантийные магмо-термо-флюидо-динамические и внутрикоровые гранитоидно-гидротермально-метасоматические золотоносные системы // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т.311. №1. С. 36-45.
13. Крутоус М.П. Низкотемпературный метаморфизм рудовмещающих толщ и методика его изучения в золотоносных районах Северо-Востока СССР при геологическом картировании масштаба 1: 50 000 // Метаморфические комплексы Северо-Востока СССР, их рудоносность и геологическое картирование. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН. 1992. С. 124-143.
14. Куйбида М.Л. Базальтовый вулканизм системы островная дуга-задуговой бассейн (Алтайская активная окраина) // Тихоокеанская геология. 2019. Т.38. №3. С. 108-120.
15. Маруяма Ш., Сафонова И.Ю., Туркина О.М., Обут О.Т., Кривоногов С.К., Гурова А.В. Геология и магматизм конвергентных окраин тихоокеанского типа. Новосибир. гос. ун-т. – Новосибирск: ИПЦ НГУ. 2018. 96 с.
16. Петрографический словарь. М.: Недра. 1981.
17. Ребецкий Ю.Л. О механизмах генерации избыточного горизонтального сжатия в континентальной коре // Физика Земли. 2023. №3. С. 63-77.
18. Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю. Напряженное состояние в афтершоковой области землетрясения Тохоку 11.03.2011 // Вулканология и Сейсмология. 2021. №4. С. 22-44.
19. Ребецкий Ю.Л., Стефанов Ю.П. О механизме взаимодействия сильных землетрясений и вулканизма в зонах субдукции // Вестник КРАУНЦ. 2022. Т.56. №4. С. 41-58.
20. Романюк Т.В., Ткачев А.В. Геодинамический сценарий формирования крупнейших мировых миоцен-четвертичных борлитиеносных провинций. М.: Светоч Плюс. 2010. 304 с.
21. Hasegawa A., Horiuchi S., Umino N. Seismic structure of the northeastern Japan convergent plate margin: A synthesis // Journal of Geophysical Research. 1994. Vol.99. P. 22295-22311.
22. Hasegawa A., Umino N., Takagi A. Double-planed deep seismic zone and upper mantle structure in the Northeastern Japan Arc // Geophysical Journal International. 1978. Vol.54. P. 281-296.
23. Maruyama S., Hasegawa A., Santosh M., Kogiso T., Omori S., Nakamura H., Kawai K., Zhao D. The dynamics of big mantle wedge, magma factory and metamorphic-metasomatic factory in subduction zones // Gondwana Research. 2009. Vol.16. P. 141-430.

24. *Omori S., Kamiya S., Maruyama S., Zhao D.* Morphology of the intraslab seismic zone and devolatilization phase equilibria of the subducting slab peridotite // *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*. 2002. Vol.76. P. 455–478.
25. *Omori S., Kita S., Maruyama S., Santosh M.* Pressure-temperature conditions of ongoing regional metamorphism beneath the Japanese Islands // *Gondwana Research*. 2009. Vol.16. P. 458–469.
26. *Omori S., Komabayashi T., Maruyama S.* Dehydration and earthquakes in the subducting slab: Empirical link in intermediate and deep seismic zones // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2004a. Vol.146. P. 297–311.
27. *Sillitoe R.H., Hedenquist J.W.* Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits // *Society of Economic Geologists Special Publication*. 2003. Vol.10. P. 315–343.

ЧАСТЬ II. МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ

СВЯЗЬ НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ РАЗЛОМНОЙ ЗОНЫ ЧАРЛИ ГИББС НА ПОВЕРХНОСТИ ДНА С ГЛУБИННЫМИ МАНТИЙНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

Артемов О. А.¹, Соколов С. Ю.¹

¹ – Геологический институт РАН, г. Москва, Россия; oleg.artemov.00@mail.ru

Разломная зона Чарли Гиббс расположена на широте ~52°с.ш. в Северной Атлантике представляет собой сдвоенный трансформный разлом с суммарным смещением сегментов Срединно-Атлантического хребта (САХ) ~350 км. Район исследования нехарактерен для стандартной геометрии трансформных разломных элементов, он выделяется следующими уникальными геологическими и геодинамическими особенностями:

- Морфология и тектонические элементы, выявляемые по дислокациям рефлекторов в сейсмоакустических данных;
- Расположение кластеров сейсмических событий вне осей положительных магнитных аномалий рифтов;
- Инверсия преобладания скоростей спрединга с восточного на западное к северу от разлома;
- Конфигурация аномального гравитационного поля в редукции Буге с дублирующимися минимумами к востоку от оси САХ;
- Близость источников сноса осадочного материала, приносимого в зону разлома Чарли Гиббс, поскольку он является коридором для придонных течений Северной Атлантики (рис. 1).

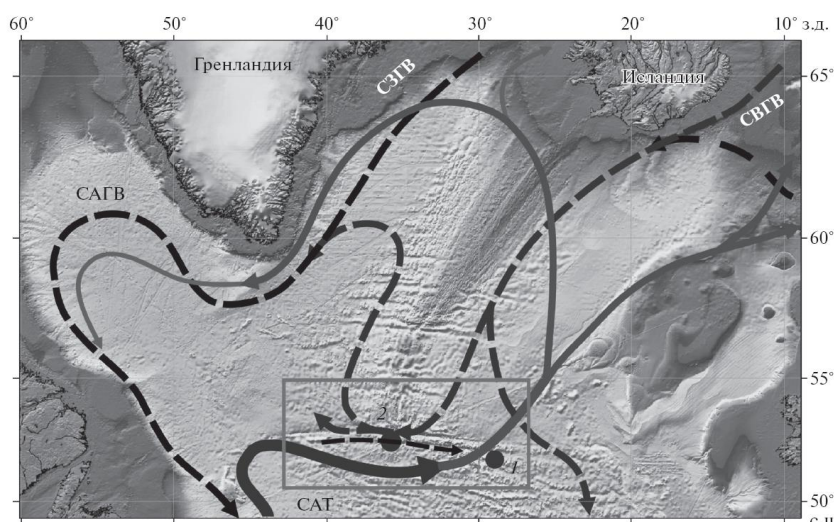


Рис. 1. Общая схема поверхностной (сплошные линии) и придонной (штриховые линии) циркуляции в Северной Атлантике: САТ – Северо-Атлантическое течение; СВГВ – Северо-восточная глубинная вода; СЗГВ – Северо-западная глубинная вода; САГВ – Северо-Атлантическая глубинная вода. Рамкой выделен район трансформного разлома Чарли-Гиббс [Баширова и др., 2017]

Слабоконсолидированные осадки на подвижном океаническом фундаменте позволяют выделить современные деформации по сейсмоакустическим данным верхней части разреза. В районе трансформной структуры выделяются признаки субмеридионального смещения приразломных уступов, вариативность морфологии кровли базальтового фундамента, неравномерное распределением сейсмичности вдоль разломных трогов.

Наиболее полные сведения о разломной зоне Чарли Гиббс были получены в 2020 году в ходе экспедиции ГИН РАН, проходившей на 50-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов». В процессе работы использовались методы сейсмоакустического профилирования, многолучевого эхолотирования, донного опробования и магнитометрии. В результате обработки ~5560 км данных сейсмоакустики высокого разрешения (САВР) выделено 123 разломных нарушений различной кинематики, 34 складчатых нарушений и 37 других осадочных объектов. На основании составленного каталога объектов были построены карты пространственных распределений приповерхностных тектонических дислокаций, в частности штамповых складок (рис. 2).

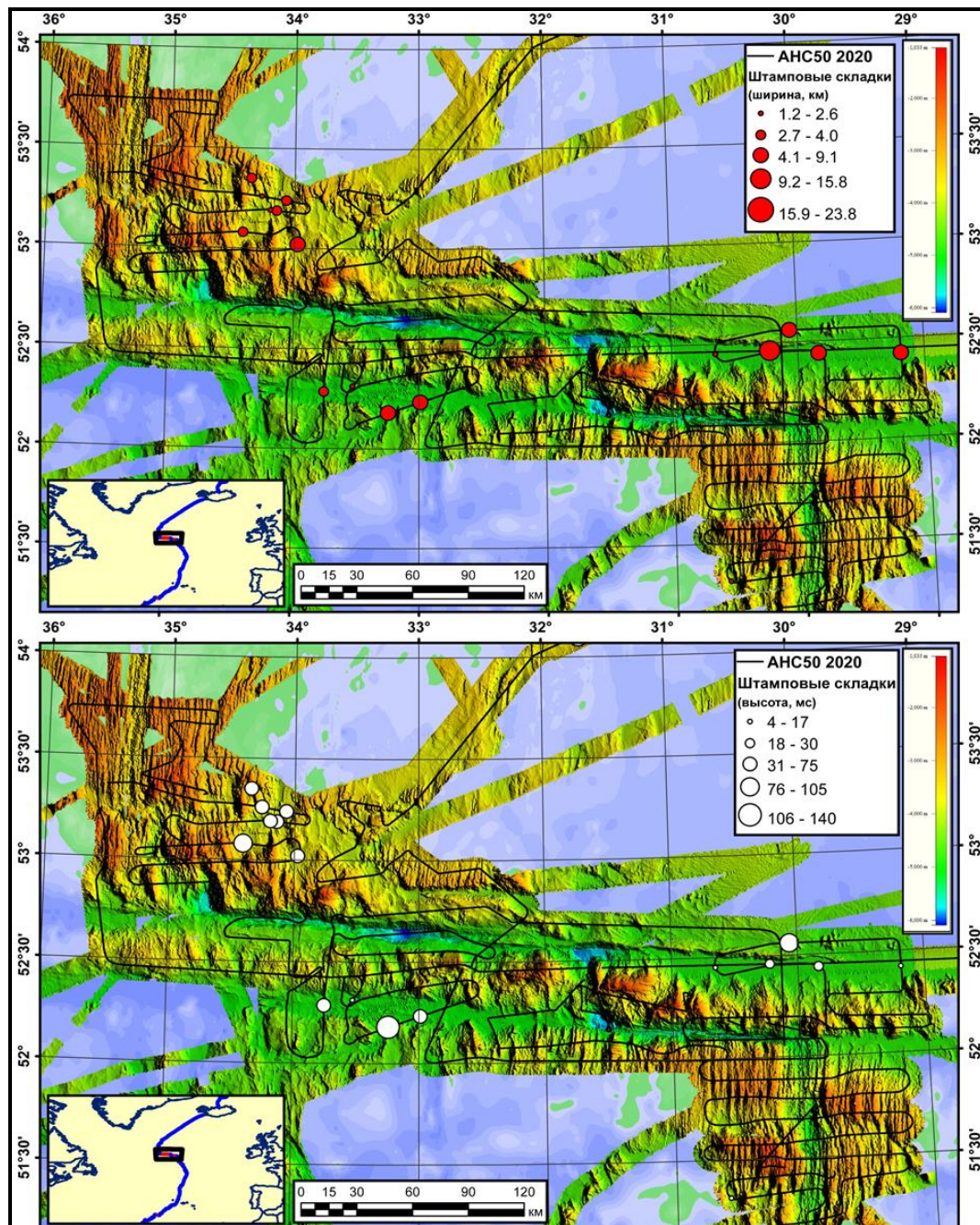


Рис. 2. Карта распределения штамповых складок в пределах трансформной зоны Чарли-Гиббс по данным САВР с градуировкой по ширине (сверху) и высоте (снизу)

Штамповые складки представляют собой локальные складчатые структуры с пологим замком, возникающие в осадочном чехле под воздействием вертикальных движений блоков кристаллической коры, на которых отложен слабоконсолидированный осадочный чехол. В районе Чарли Гиббс наличие подобных структур свидетельствует о процессах локальной тектонической активности. Распределение штамповых складок в зоне Чарли Гиббс показывает их группирование в кластеры, приуроченные к трансформным трогам и межразломным сегментам.

Кроме того, в рамках обработки данных для представляемого доклада были привлечены данные региональных геофизических полей из открытых источников. В рамках рассматриваемого этапа исследования особое внимание уделено анализу неотектонических процессов через картирование поверхностных деформаций осадочного чехла (рис. 2), а также описанию региональных геодинамических процессов и возможного сценария их современного развития. Эти результаты базируются на объемных геофизических данных и полученном в результате сейсмоакустического картирования распределении поверхностных деформаций. Данные сейсмотомографии отражают неоднородность термального состояния мантии, влияющей на

поверхностные структуры. Ключевым фактором этого влияния является Исландский плюм к северу от разломной зоны Чарли Гиббс. Разломная зона играет роль структурного «холодного» барьера, к северу от которого по данным плотностной томографии видны следы субширотного смещения осевой прогретой зоны (рис. 3). Согласно, разрезам аномалии скоростей V_p представленным на рисунке 3, региональный фон задаётся устойчивым понижением скоростей Р-волн в верхней мантии вдоль рифта САХ, формирующим «канал» тёплой и разуплотнённой мантии на глубинах порядка 80-220 километров. Этот канал наиболее выражен в исландском сегменте САХ, где плюмовое питание создаёт обширную низкоскоростную область, и постепенно затухает к юго-западу.

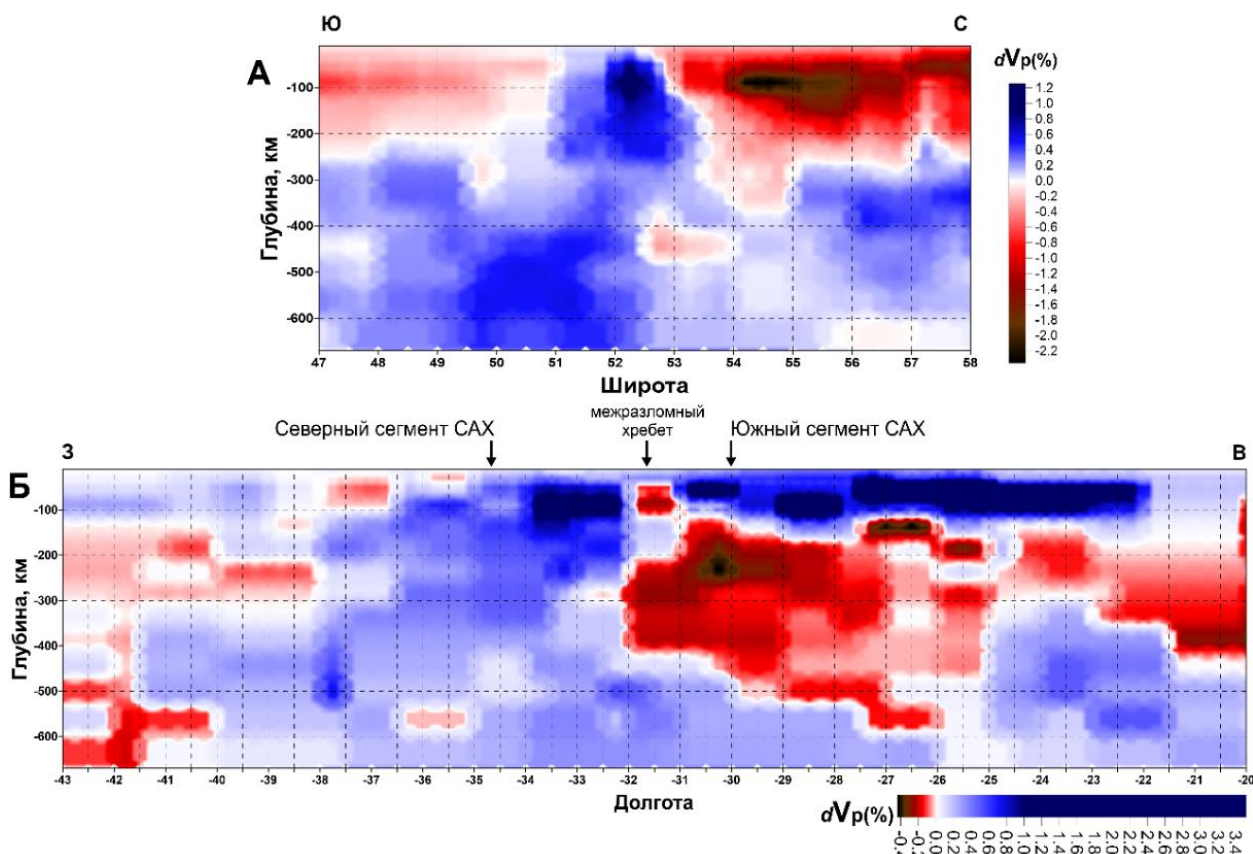


Рис. 3. Субмеридианальный (А) и субширотный (Б) разрезы аномалий скоростей Р-волн по данным сейсмотомографической модели UU-P07

По данным сейсмотомографической модели UU-P07 выполнено построение сетки из 16 региональных профилей с глубинными вариациями сейсмических скоростей (не выявлено вдольосевого восходящего потока из нижней мантии, «горячий» поток наблюдается только сбоку под межразломным хребтом). Субмеридианальный разрез демонстрирует характерное чередование высокоскоростных и низкоскоростных областей (рис. 3а). Повышенные скорости (синие аномалии) прослеживаются на глубинах до 400-600 км под окраинами оси, указывая на утолщённую и охлаждённую литосферу океанской плиты, мощность которой увеличивается по мере охлаждения при удалении от зоны спрединга.

К северу от разломной зоны и к востоку от оси САХ выделяется дублирование разуплотнённых объемов – предполагаемых следов палео-плюмов, наличие подобной серии минимумов контрастной плотности также может указывать на западный дрейф Северо-Американской плиты. К югу от разлома выделяется корень микроплюма, выделяемый по контрасту плотности с региональными значениями плотности по модели [Sandwell, Smith, 2009] (рис. 4). Таким образом, данные плотностной и сейсмической томографии показывают значительное влияние плюмов к северу (Исландский) и к Югу (Азорский) на реологическое состояние верхней мантии в исследуемом районе. Срез на глубине 50 километров по данным модели плотностных вариаций также указывает на влияние западного дрейфа Североамериканской плиты на региональные особенности мантии к северу от разлома Чарли Гиббс. Такой же по величине дрейф Евразийской плиты на восток маловероятен.

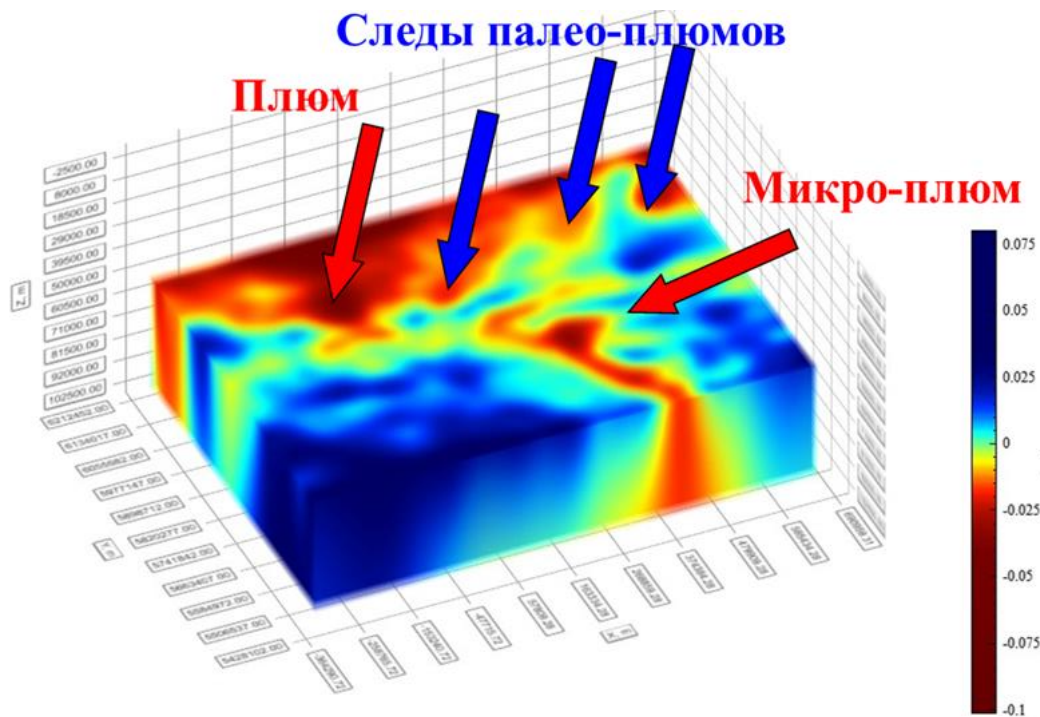


Рис. 4. Срез на глубине 50 км 3D-модели плотностной томографии в районе Чарли Гиббс, рассчитанной по данным аномалий Буге, по спутниковой альтиметрии и [Sandwell, Smith, 2009] в ПО GravMagInv

Согласно проведенному комплексированию данных аномалии силы тяжести в редукции Буге с пространственным распределением приповерхностных объектов выделяется субширотное дублирование осевого минимума на востоке и возможный максимум палео трансверсивного хребта к северу от северного трога Чарли Гиббс с признаками сдвига вне современной активной зоны (рис. 5).

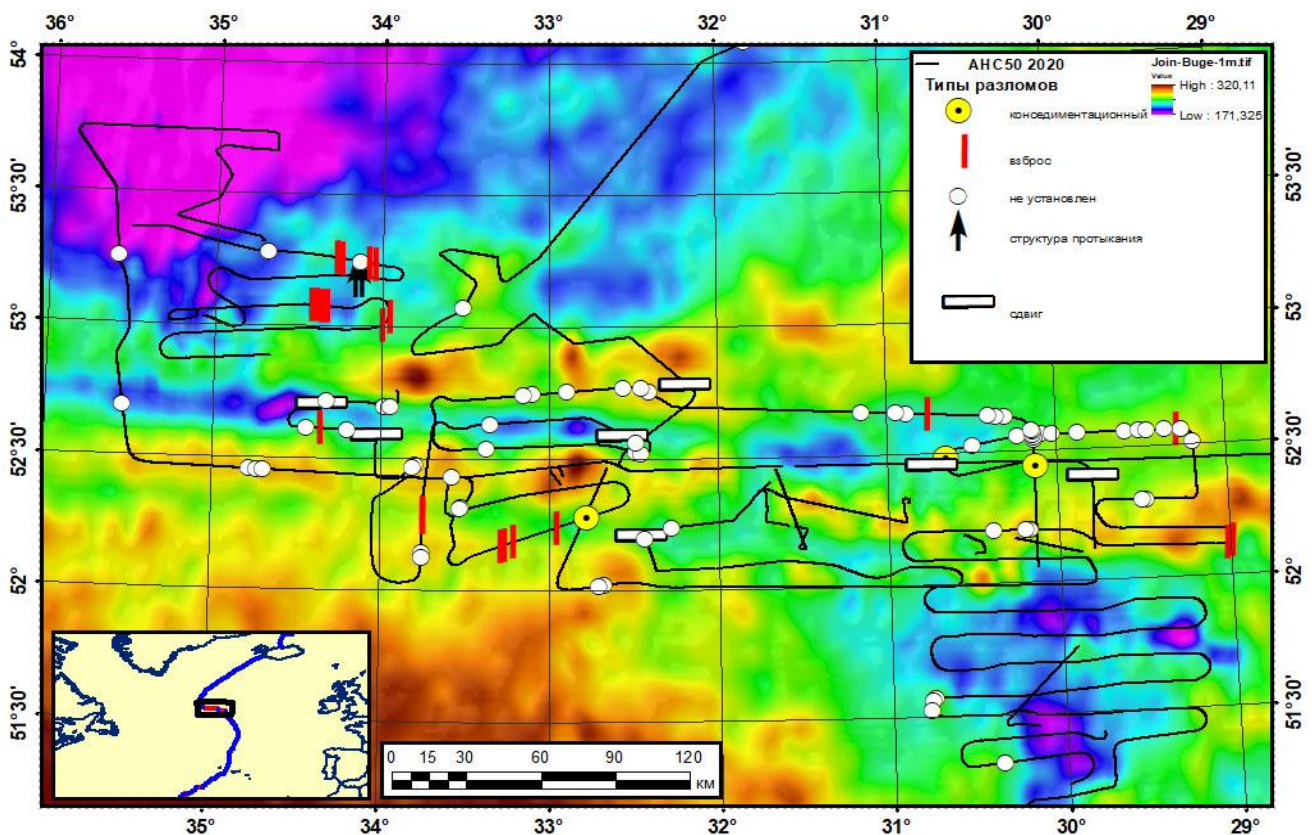


Рис. 5. Распределение разрывных нарушений верхней части разреза осадочного чехла по данным высокочастотного профилографа, разлом Чарли Гиббс и аномалии силы тяжести в редукции Буге, рассчитанные по данным спутниковой альтиметрии [Sandwell, Smith, 2009]

Выводы:

1. В ходе анализа данных САВР приповерхностной части осадочного разреза были выявлены осадочные структуры и тектонические дислокации различного генезиса. Была произведена типизация структур с последующим составлением соответствующей таблицы, а также построение карт пространственного распределения выделенных структур.

2. Выявленные тектонические нарушения верхней части осадочного чехла являются отражением тектонических движений, сформированных за счет неоднородной кинематики плит и физических неоднородностей в верхней мантии.

3. Настоящая работа рассматривает нарушения в осадочном чехле в качестве свидетельств неотектонических и оползневых процессов в районе разломной зоны Чарли Гиббс. Исследование будет продолжено в сторону комплексирования данных глубинных геофизических полей

Литература

1. Баширова Л.Д., Дорохова Е.В., Сивков В.В., Андерсен Н., Кулешова Л.А., Матюль А.Г. Палеотечения в районе разлома Чарли-Гиббс в позднечетвертичное время // *Океанология*. 2017. Т.57. №1. С. 491–502.

2. Соколов С.Ю., Денисова А.П., Патина И.С. Геодинамический режим восточной пассивной части сдвоенного трансформного разлома Чарли Гиббс (Северная Атлантика) // *Доклады Академии Наук. Науки о Земле*. 2024. Т.517. №1. С. 795–803.

3. Dorokhova E.V., Sokolov S.Yu., Ponomarenko E.P., Bashirova L.D., Pugacheva T.L., Urazmuratova Z.F., Laskina D.N., Dobrolyubova K.O. Current-controlled sedimentation in a megatransform system: a case study of the Charlie-Gibbs Fracture Zone // *Geological Society of London. Special Publications*. 2024. Vol.553.

4. Sandwell D.T. and Smith W.H. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate // *Journal of geophysical research*. Vol.114.

СТРУКТУРНЫЕ СТИЛИ ФУНДАМЕНТА СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ ПО ДАННЫМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

Боголюбский В. А.^{1,2}, Соколов С. Ю.², Харченко С. В.^{1,3}

¹ – *Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; bogolubskiyv@yandex.ru*

² – *Геологический институт РАН, г. Москва, Россия*

³ – *Институт географии РАН, г. Москва, Россия*

В настоящее время существует большое количество исследований, направленных на изучение структурообразования в зонах современного спрединга. На районы осевой зоны срединно-океанических хребтов (СОХ) существуют детальные батиметрические съёмки, позволяющие описать фундамент океанической коры. Для характеристики единого комплекса структур фундамента различного генезиса и отличающегося от других участков океанического дна, целесообразно использовать понятие «структурный стиль» [Соколов, Боголюбский, 2025]. Различные структурные стили фундамента характеризуются разными режимами аккреции, при которых формируются либо линейные структуры с практически постоянной амплитудой и разным азимутом аномалий, либо области с потерей линейности, либо области с наложенной на линейный рисунок мозаичностью.

Исследования по проблеме унаследованности структурного стиля фундамента от границы континент-океан до оси спрединга практически отсутствуют. К настоящему моменту для Срединно-Атлантического хребта (САХ) имеются работы лишь по отдельным его участкам, демонстрирующим изменение структурообразования на спрединговом хребте с течением времени. Так, имеются исследования вблизи границы океан-континент (ГОК), в частности в районе континентальной окраины Бразилии [Ferreira et al., 2009], где на основании сопоставления сейсмических, гравитационных и магнитных данных было показано, что структурный стиль фундамента претерпел значительные изменения в сравнении с приосевой частью [Equatorial..., 1996].

Зоны аномального строения фундамента известны на флангах САХ, начиная с 1960-х гг. Так, в работе [Хейзен и др., 1962] приводятся наблюдения обособленной группы абиссальных холмов на фланге хребта, значительно удалённом от современной оси. По сравнению с прилегающими участками данные холмы всё ещё не подверглись полному осадочному заполнению и остаются видными в рельефе, что указывает на его развитие в несколько отличных геодинамических условиях (вероятно, за счёт более интенсивного магматизма или изменений кинематики спрединга) от соседнего участка. Таким образом, выявление различных по своему строению участков океанического дна позволяет проследить изменения геодинамических условий развития рифтогенеза и спрединга с момента начала раскола континентальной литосферы и связать изменения структуры фундамента с известными тектоническими и магматическими событиями в регионе. Во многом, современные исследования структурного стиля направлены на решение прикладных задач в локальных масштабах: структуры фундамента могут служить резервуарами нефтегазовых месторождений. Но структурные карты регионального масштаба на зоны ГОК и флангов СОХ публикуются крайне редко из-за ресурсной направленности работ. Целью работы является выявление различных структурных стилей фундамента и установление их связи с геодинамическими факторами и условиями развития на примере Ньюфаундлендско-Иберийского сегмента.

Рассматриваемый сегмент располагается между Азоро-Гибралтарским разломом и разломом Чарли-Гиббс. В настоящее время скорости спрединга варьируют от 21 до 24 мм/год. Крупные поперечные нарушения, кроме разлома Максвелла в настоящее время в пределах сегмента отсутствуют. В южной части сегмента САХ подвержен значительному влиянию Азорского плюма, который приводит к интенсивному магматизму, формированию Азорского плато, которое рассекается рифтом Терсейра, ультрамедленным центром растяжения, косым по отношению к САХ, соединяющего его с Азоро-Гибралтарским разломом. Во фланговой зоне также имеется ряд косых по отношению к направлению растяжения отрицательных структур: трог Кинг, рифт Бискайского залива, а также вулканических поднятий: Азоро-Бискайское, Западное и Восточное Туле, горы Милн, Ньюфаундлендские, Педро Нуньеса и др. Причём прослеживается явная асимметрия: большая часть таких структур располагается на восточном фланге САХ. Кроме того, в целом, рельеф восточного фланга является более приподнятым в сравнении с западным. Ньюфаундлендско-Иберийский сегмент начал своё раскрытие около 130 млн лет назад в южной части и 108 млн лет – в северной. Граница между двумя подсегментами проходит приблизительно по оси растяжения Бискайского

залива. Граница океан-континент отличается сложностью своего строения: предполагается наличие гиперрастянутых окраин Ньюфаундленда и Иберии с отмершими осями растяжения и краевыми плато на Ньюфаундленде и серпентинитовыми поднятиями в Иберии.

Для характеристики структурных стилей фундамента широкое распространение получили данные аномального магнитного поля, однако, эти глобальные модели построены по неравномерным гидромагнитным съёмкам с заполнением пустых участков спутниковыми данными с низким разрешением и интерполяцией. Поэтому эти данные нашли широкое применение для качественного анализа структурообразования, но неприменимы для количественного. В то же время, гравитационное поле отличается большей равномерностью съёмки, но существенным его недостатком является сглаженность и отсутствие детальности на флангах САХ за счёт больших мощностей осадочного чехла. Тем не менее, результаты предшествующих работ [Ferreira et al., 2009] продемонстрировали возможность сопоставления структур фундамента по данным сейсмического профилирования и вторых производных поля силы тяжести в свободном воздухе ($\Delta g_{с.в.}$). Ранее нами была также продемонстрирована эффективность использования спектральных характеристик гравитационного поля для выявления структурных стилей фундамента Ньюфаундлендско-Иберийского сегмента [Соколов, Боголюбовский, 2025]. Однако эти подходы затруднительно использовать непосредственно для площадной кластеризации структур океанической коры по структурным стилям с целью определения её генезиса и эволюции, кроме того, затруднительным является само выделение отдельных структур фундамента.

Задача выделения отдельных структур фундамента обусловила необходимость подбора такой трансформанты гравитационного поля, которая позволила бы выделить сглаженные за счёт осадочного чехла структуры. В качестве такой трансформанты был определён индекс конвергенции, который позволяет выделять высшие точки, откуда происходит снос вещества при предположительном его перемещении под влиянием гравитации, и низшие точки, точки аккумуляции вещества. В контексте структур фундамента высшие точки могут быть соотнесены с гребнями поднятий фундамента, а низшие точки – с днищами впадин. Таким образом, возможно построить сеть поднятий и впадин и рассчитать их длину, ориентировку и плотность (рис. 1). Эти параметры во многом зависят от режима аккреции литосферы и просты для интерпретации, поэтому могут быть использованы для интерпретации классов структурных стилей фундамента.

Для реализации кластеризации дна океана по трансформантам $\Delta g_{с.в.}$ были рассчитаны спектральные характеристики гравитационного поля, которые ранее себя хорошо зарекомендовали при мелкомасштабной кластеризации рельефа материков [Харченко, 2022]. Методика основана на возможности представления любой цифровой модели рельефа в качестве суммы колебаний определённых частот с помощью двумерных дискретных преобразований Фурье. Из получаемого Фурье-образа можно извлекать различные фокальные характеристики, отражающие основные морфологические особенности данного участка растра. Всего использовалось восемь характеристик: длина волны наиболее значимой гармоник, её амплитуда, значимость трёх важнейших гармоник, генеральное направление колебаний поля $\Delta g_{с.в.}$, степень его выраженности, коэффициенты аппроксимации частотно-амплитудного спектра экспоненциальным уравнением: постоянная составляющая амплитуды (стартовая амплитуда при волновом числе – 0 волн на участок), начальная «скорость» её убывания и достоверность аппроксимации спектра. Расчёт параметров проводился в окнах от 40 до 100 ячеек растра с шагом 10 ячеек. Использование различных окон для расчёта было необходимо для учёта возможной полимасштабности гармоник в окрестности точки расчёта. В качестве исходного растра $\Delta g_{с.в.}$ была выбрана модель Sandwell et al. [2014], размер ячейки растра для расчёта был приведён к 2000*2000 м.

После расчёта спектральных характеристик была проведена кластеризация полученных данных по методу самоорганизующихся карт Кохонена. Предварительно данные были центрированы, стандартизированы и трансформированы с помощью преобразований Бокса – Кокса. Затем по преобразованным переменным строятся узлы нейронной сети Кохонена по 56 признакам (8 признаков по 7 размерам окна), и каждый пиксел соотносится с ближайшим к нему узлом, притягивая также остальные соседние пикселы и образуя ядро кластера.

В результате кластеризации был получен растр с 25 кластерами, которые далее были иерархически агрегированы в 8 кластеров во избежание избыточного дробления отображаемых единиц. Полученные кластеры отображают структуры фундамента с различными параметрами расчленения. Таким образом, можно говорить о получении карты структурных стилей фундамента для Ньюфаундлендско-Иберийского сегмента Атлантики. Так, были выделены комплексы мало-, средне- и крупноамплитудных структур, а также переходные зоны средне- и крупноамплитудных

структур. Отдельно выделяются крупные впадины и поднятия, к которым относятся рифтовая долина САХ, трансформные разломы, некоторые пассивные окраины, подводные поднятия и горы. Также могут быть выделены впадины регионального масштаба, включающие глубокие участки рифтовых долин, некоторые пассивные окраины, рифтогенные структуры и трансформные разломы. Также для двух последних кластеров отдельно выделяется кластер переходных рифтогенных структур и наиболее глубокие рифтогенные впадины. Обоснование значений кластеров основано в том числе на результатах выделения отдельных структур фундамента по растру индекса конвергенции.

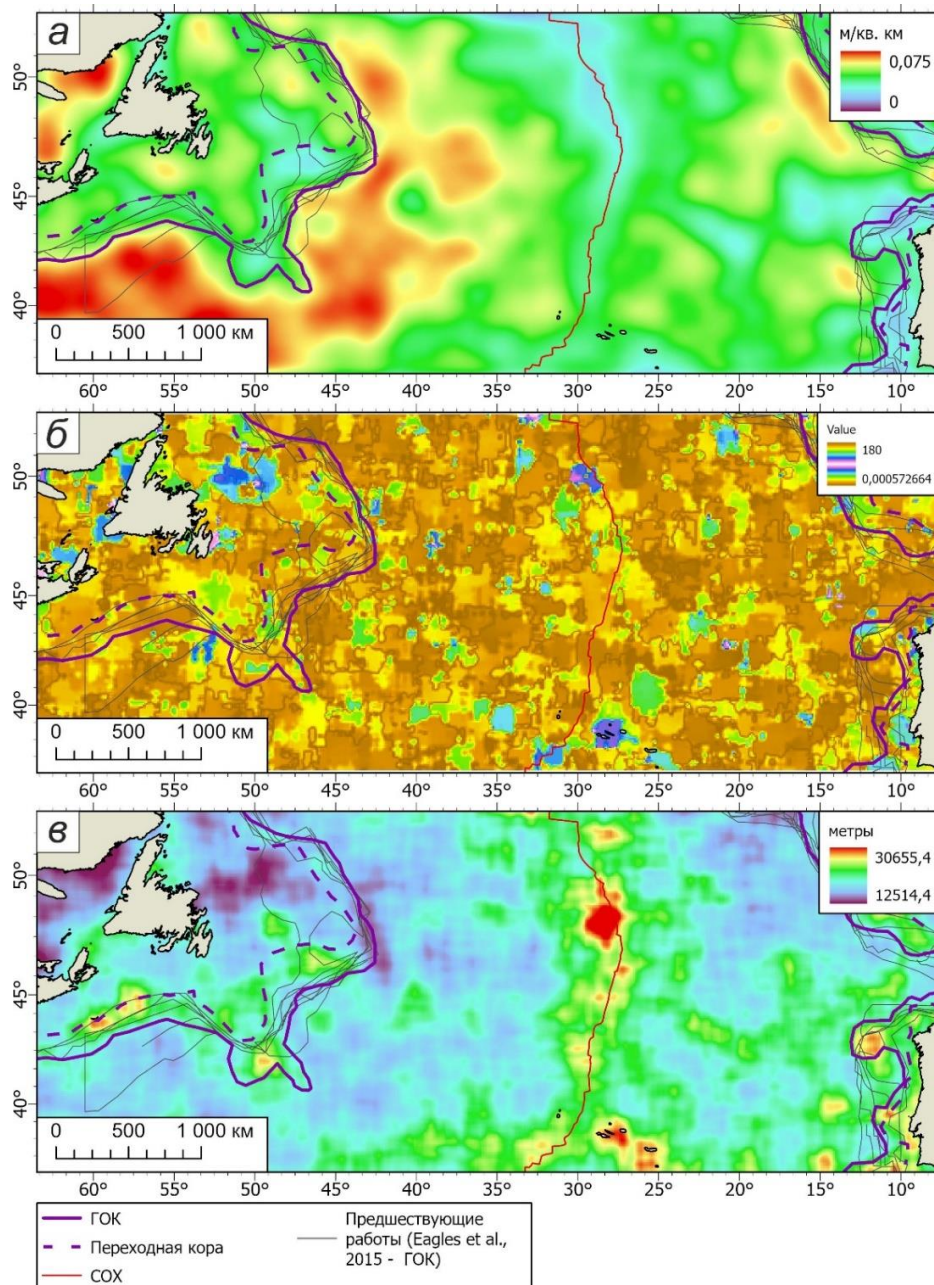


Рис. 1. Атрибуты гребней поднятий фундамента: (а) – плотность, (б) – средняя ориентировка, (в) – средняя длина

Результаты извлечения структур фундамента по растру конвергенции легли в основу карты плотности структур фундамента (рис. 1а). На полученной карте отчётливо фиксируется ГОК в виде минимума плотности структур. Она в значительной степени отличается как от наиболее ранней океанической коры, где преобладают близкие к максимальным значения плотности структур, так и от континентального шельфа, где также наблюдаются повышенные значения. Сколь-нибудь выраженных шельфовых повышенных значений не выделяется лишь у континентальной окраины Иберии, где в целом проявляются наиболее низкие значения во всём районе. Проведённые ГОК и граница переходной коры хорошо согласуются с предшествующими данными [Eagles et al., 2015].

Непосредственно характеристики океанической коры разительно отличаются по-западному и восточному флангам САХ. Если на западном фланге в области наиболее раннего растяжения прослеживается обширный район повышенных значений плотности гребней фундамента, то на восточном фланге присутствует лишь небольшой участок повышенных значений плотности структур в районе Ирландии. С увеличением скорости спрединга плотность структур начинает стремительно уменьшаться, достигая минимума в районе современного САХ. Причём несколько большие значения наблюдаются в районе Азорского плато, что, вероятно, обусловлено влиянием горячей точки. Локальные минимумы плотности структур приурочены к магматическим поднятиям, а также косым отрицательным структурам.

Средняя ориентировка (рис. 1б) структур сравнительно слабо изменяется от ГОК до оси САХ, даже несмотря на выявленные изменения направления растяжения. При этом, полученный растр отличается своей мозаичностью, что, по-видимому, может указывать на небольшие колебания режимов аккреции в течение всей эволюции спредингового сегмента. Значительные отличия в ориентировке наблюдаются только в пределах крупных косых структур, магматических поднятиях и на ГОК. Длина структур (рис. 1в) не показывает каких-либо значительных различий аккреции коры, однако также позволяет выделять ГОК, косые структуры и магматические поднятия, которые выражаются в виде максимума значений.

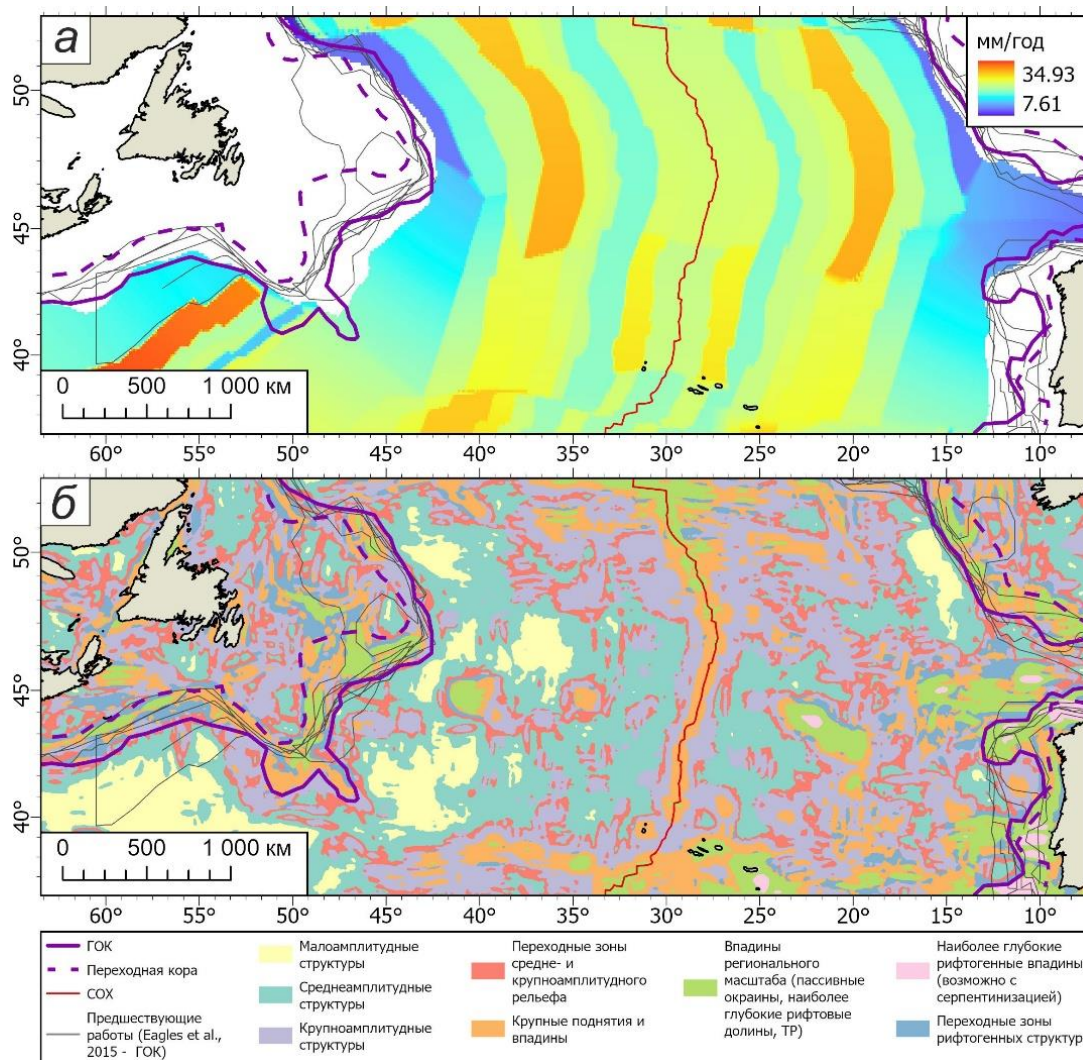


Рис. 2. Скорость спрединга и выделенные кластеры: (а) – скорость спрединга, (б) – кластеры по спектральным характеристикам $\Delta g_{с.в.}$.

Результаты кластеризации позволяют более отчётливо отделить структуры океанической коры от переходной и континентальной утонённой. Отличительной особенностью переходной коры является наличие классов крупных поднятий и впадин и впадин регионального масштаба, а также смежных с ними переходных структур. К переходному типу коры можно отнести также поднятия и впадины Иберийской окраины, которые не отделяются от основного массива переходной коры, а

также отмерший рифт Ньюфаундлендского шельфа, отделяющий краевое плато Орфан. В противоположность этому, континентальная кора представлена средне- и крупноамплитудными структурами, а также переходными и имеет пятнистый рисунок.

Для океанической коры характерно более однородное строение с последовательной сменой структурных кластеров от ГОК до оси спрединга. Наиболее древние части представлены преимущественно мелкоамплитудными структурами, которые соответствуют районам наибольшей плотности структур по данным раstra конвергенции. Однако вблизи ГОК имеются участки и более крупноамплитудных структур. При приближении к оси САХ начинают преобладать среднеамплитудные структуры в центральной части западного фланга. На восточном фланге они представлены в значительно меньшей степени небольшими островами. В северной и южной частях обоих флангов (а также в центральной части восточного фланга) преобладают в основном крупноамплитудные структуры. Возможно, это связано с влиянием горячих точек: с севера и юга – Исландской и Азорской, соответственно, а с восточного фланга – ныне неактивных горячих точек. На севере присутствуют трансформные разломы, представленные структурами регионального масштаба, которые обрамлены крупноамплитудными структурами.

Обращают на себя внимание и многочисленные магматические поднятия, отчётливо представленные структурами регионального масштаба и обрамлённые крупноамплитудными структурами. Аналогичным образом выражается и рифтовая долина практически на всём своём протяжении, особенно выделяясь в северной и южной частях, где она отличается наибольшими глубинами. Следует отметить и наличие глубочайших впадин в пределах Иберийской окраины, трога Кинг, оси рифта Бискайского залива и рифта Терсейра, что, вероятно, может указывать на их единое происхождение и, возможно, наличием серпентинитовых протрузий, за счёт пониженной плотности существенно влияющих на гравитационное поле. Эти породы были обнаружены на Иберийской окраине и в пределах трога Кинг.

Таким образом, проведённая кластеризация по спектральным характеристикам $\Delta g_{с.в.}$ позволила выделить различные по своим морфологическим, а в некоторых случаях и генетическим характеристикам структурные стили Ньюфаундлендско-Иберийского сегмента. Отчётливо отделяются друг от друга континентальная, переходная и океаническая типы коры. Хорошо прослеживаются все типы подводных поднятий и косых структур, а также асимметрия строения фундамента данного сегмента по-восточному и западному флангу. Полученные кластеры отражают схожие закономерности и согласуются с характеристиками выделенных по растру конвергенции гребнями поднятий фундамента. Данный метод может быть применён также и к другим сегментам Атлантики для выявления сходств и различий в процессе раскрытия океана.

Работа выполнена при поддержке Проекта РФФ № 24-17-00097 «Атлантико-Арктическая рифтовая система: сегментация, эволюция, структурообразование и современная геодинамика».

Литература

1. Соколов С.Ю., Боголюбовский В.А. Эволюция структурного стиля фундамента Северной Атлантики от раскола континента до современного рифтогенеза по данным гравитационного поля // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2025. Т.65. №1. С. 49–61.
2. Харченко С.В. Спектральные характеристики рельефа: расчет и использование в морфометрическом картографировании // Геодезия и картография. 2022. №5. С. 27–40.
3. Хейзен Б., Тарн М., Юинг М. Дно Атлантического океана. М.: Изд. ин. Лит. 1962. 148 с.
4. Eagles G., Pérez-Díaz L., Scarselli N. Getting over continent ocean boundaries // Earth-Science Reviews. 2015. Vol.151. P. 244–265.
5. Equatorial Segment of the Mid-Atlantic Ridge. Initial Results of the Geological and Geophysical Investigations under the EQUARIDGE Program, Cruises of R/V “Akademik Nikolaj Strakhov” in 1987, 1990, 1991. UNESCO, 1996. Text: 128 p. Atlas: 32 p.
6. Ferreira T.S., Caixeta J.M., Lima F.D. Controle do embasamento no rifteamento das bacias de Camamu e Almada // B. Geoci. Petrobras. 2009. Vol.17. No.1. P. 69–88.
7. Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // Science. 2014. Vol.346. No.6205. P. 65–67.
8. Seton M., Müller R.D., Zahirovic S. et al. A Global Data Set of Present-Day Oceanic Crustal Age and Seafloor Spreading Parameters // Geochem., Geophys., Geosyst. 2020. Vol.21. Iss.10. e2020GC009214.

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В РАЙОНАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СПРЕДИНГОВЫХ ХРЕБТОВ И ВНЕОСЕВЫХ МАНТИЙНЫХ ПЛЮМОВ

Боголюбский В. А.^{1,2}

¹ – Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; bogolubskiyv@yandex.ru

² – Геологический институт РАН, г. Москва, Россия

Срединно-океанические хребты (СОХ) являются планетарной структурой и протягиваются через все океаны на расстояние около 70 тыс. км. Их рифтовые зоны представляют собой места формирования новой океанической коры. Рельеф и глубинное строение рифтовых зон СОХ отличаются в основном в зависимости от скорости спрединга. К настоящему времени накоплен обширный материал об их строении и эволюции. Было показано, что в областях проявления «горячих точек» на оси хребта или в непосредственной близости от него строение срединно-океанических хребтов может значительно отличаться. В ходе предшествующих работ были рассчитаны ряд количественных параметров взаимодействия и построены численные и аналоговые модели для ряда районов океана, которые предполагают, как происхождение горячих точек в результате подъёма термических мантийных плюмов, так и по другим причинам [Hoggard et al., 2020; Hall, Kincaid, 2003]. В то же время области взаимодействия срединно-океанических хребтов и горячих точек выделяются значительным разнообразием в структурном и эволюционном аспектах что контролируется целым рядом факторов, связанными с геометрией межплитных границ, строением литосферы и астеносферы в областях взаимодействия, эволюцией океанического бассейна в целом, геодинамическими обстановками развития хребтов.

Взаимодействие СОХ с мантийными плюмами имеет различные структурные проявления: характерно образование подводных поднятий (Кергелен, Исландия), вытянутых хребтов, заложившихся по трансформным разломам (Шака, Дискавери II – Юго-Западный Индийский хребет). Кроме того, термическое влияние приводит к значительным изменениям в рельефе самих хребтов. Как правило, рельеф становится более приподнятым и сглаженным, характерным для хребтов с большими скоростями спрединга. Так, северные части хребта Рейкьянес, в отличие от других участков медленноспредингового Срединно-Атлантического хребта отличаются отчётливо выраженным осевым поднятием, отсутствием рифтовой долины и современных трансформных разломов, а также значительно меньшими глубинами. Такой рельеф соответствует быстроспрединговому. При удалении от центра Исландского плюма он постепенно изменяется на среднеспрединговый и медленноспрединговый. Всего область влияния Исландского плюма охватывает более 2000 км протяжённости хребта. В других случаях взаимодействия СОХ и плюмов область влияния значительно меньше, а изменения рельефа не столь существенные.

В настоящее время можно выделить около 25 областей взаимодействия мантийных плюмов и СОХ. Они присутствуют на хребтах с разными скоростями спрединга: от ультрамедленных до быстрых. В каждом случае области влияния имеют различную протяжённость, а также расчленённость в осевой области. При этом сами плюмы также в значительной степени отличаются по своим параметрам: они расположены на различном расстоянии от оси СОХ, имеют различную мощность и поднимаются с различной глубины. Мощность мантийных плюмов можно приблизительно оценить по потоку плавучести (*buoyancy flow*), который приблизительно отражает объём мантийного вещества и скорость его подъёма (а, значит, и перепады плотности). К наиболее мощным в областях взаимодействия с СОХ относятся Исландский, Галапагосский плюмы и плюм Баллени (юго-запад Тихого океана).

В противоположность традиционным представлениям, мантийные плюмы могут начинаться не только от границы ядра и мантии (D''), но и иметь внутримантийное происхождение. Данные современных моделей сейсмотомографии показывают, что многие области подъёма мантийного вещества не прослеживаются до слоя D'' . Courtillot et al. [2003] выделяют также плюмы, поднимающиеся от границы верхней и нижней мантии (660 км) и имеющие астеносферное происхождение. К первым относятся Азорский, Марион, Ян-Майен и другие, ко вторым – Дискавери и Св. Елены. Плюмы, начинающиеся от слоя D'' , включают в себя Исландский, Тристан, Реюньон, Пасхи, Луисвилл и Гавайский. Различная глубина происхождения плюмов также может выступать одним из факторов влияния на рельеф СОХ: более глубокие плюмы могут оказывать влияние на более обширную область.

Таким образом, можно выделить четыре основных параметра, которые могут оказывать влияние на формирование рельефа областей взаимодействия СОХ и мантийных плюмов: расстояние от центра плюма до оси СОХ, глубина происхождения плюма, его мощность и скорость спрединга. Кроме скорости спрединга следует учитывать и его асимметрию, что влияет на направление миграции оси СОХ к центру плюма или от него.

Для выявления степени влияния каждого фактора было проведено физическое моделирование. Оно проводилось 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 [Shemenda, Grokholsky, 1991].

После плавления вещества в установке его верхний слой охлаждается вентилятором 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 W имитирующую рифтовую зону [Грохольский, Дубинин, 2010]. Для воспроизведения термической аномалии мантийных плюмов использовался локальный источник нагрева (ЛИН). Методы визуализации результатов включали также создание цифровой модели рельефа эксперимента и фиксацию температурного поля тепловизором InfiRay T3S.

Всего было проведено более 100 экспериментов, объединённых в четыре экспериментальные серии; из них 62 оказались успешными (рис. 1а, б). В каждой из серий изменялся только один параметр при остальных трёх неизменных: мощность ЛИН, её удалённость от оси растяжения, глубина ЛИН от поверхности модели и скорость спрединга. Асимметрия спрединга в модели не учитывалась из-за наличия в модели только одной подвижной плиты при фиксированном положении другой. Однако она должна быть учтена при работе с природными данными. На этапе обработки данных строилась цифровая модель рельефа эксперимента (рис. 1в), по которой рассчитывалась вертикальная расчленённость рельефа в окне 0.5×0.5 см (рис. 1г). По полученному растру расчленённости определялась длина области влияния. Далее строилась система ячеек шириной 1 см и длиной по размеру модели к концу эксперимента, в каждой из которых определялось медианное значение расчленённости (рис. 2а). Учитывалось минимальное медианное значение в центральной части области влияния ЛИН, а также её отношение к среднему показателю медианной расчленённости за пределами области влияния (*относительная расчленённость*).

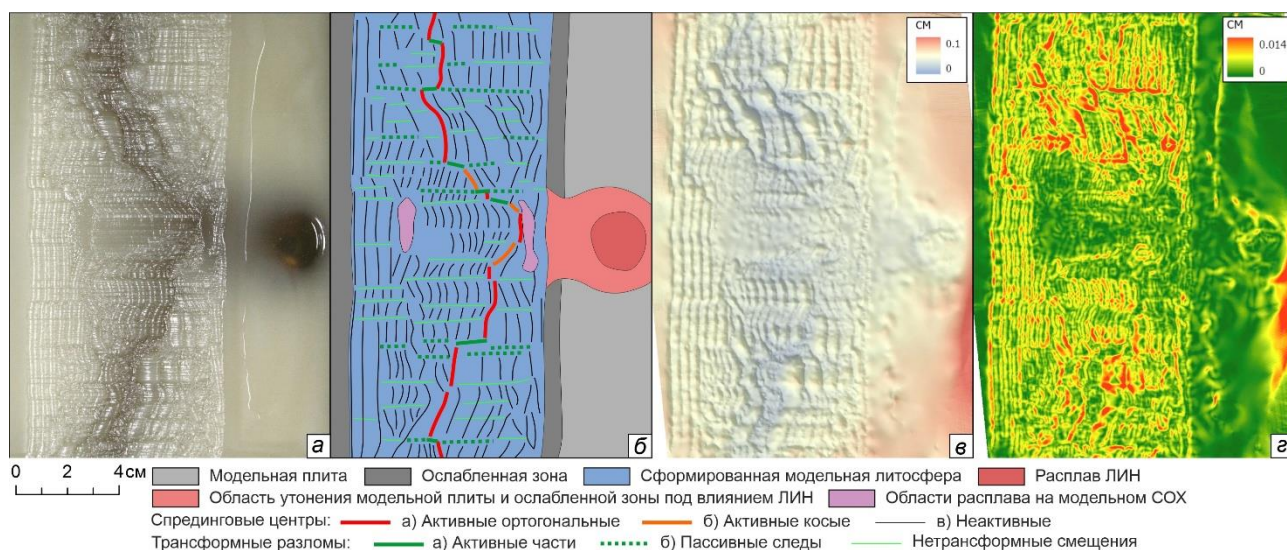


Рис. 1. Эксперимент 3042. Моделирование влияния внеосевой горячей точки на рельеф и структурообразование срединно-океанического хребта: (а) – фото эксперимента на конечной стадии развития; (б) – интерпретация эксперимента; (в) – цифровая модель рельефа эксперимента; (г) – вертикальная расчленённость рельефа

Для выявления влияния каждого параметра ЛИН на рельеф модельного хребта были построены точечные графики по каждой паре показателей и проведён регрессионный анализ для определения

уравнений зависимостей характера рельефа от параметров ЛИН. Для определения количественного вклада каждого из параметров на формирование рельефа были выбраны два подхода: множественная линейная регрессия и вычисление важности признаков (Permutation Feature Importance – PFI). В случае множественной линейной регрессии предполагается, что все параметры являются независимыми величинами, что позволяет их складывать между собой. Использовалось следующее уравнение:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \varepsilon,$$

где x_i – функции от параметров ЛИН, полученные путём регрессионного анализа; y – показатель рельефа; β_i – коэффициент, отражающий, на сколько стандартных отклонений изменится y , если x_i увеличится на 1 стандартное отклонение, то есть показывающий вклад каждого компонента; ε – ошибка аппроксимации.

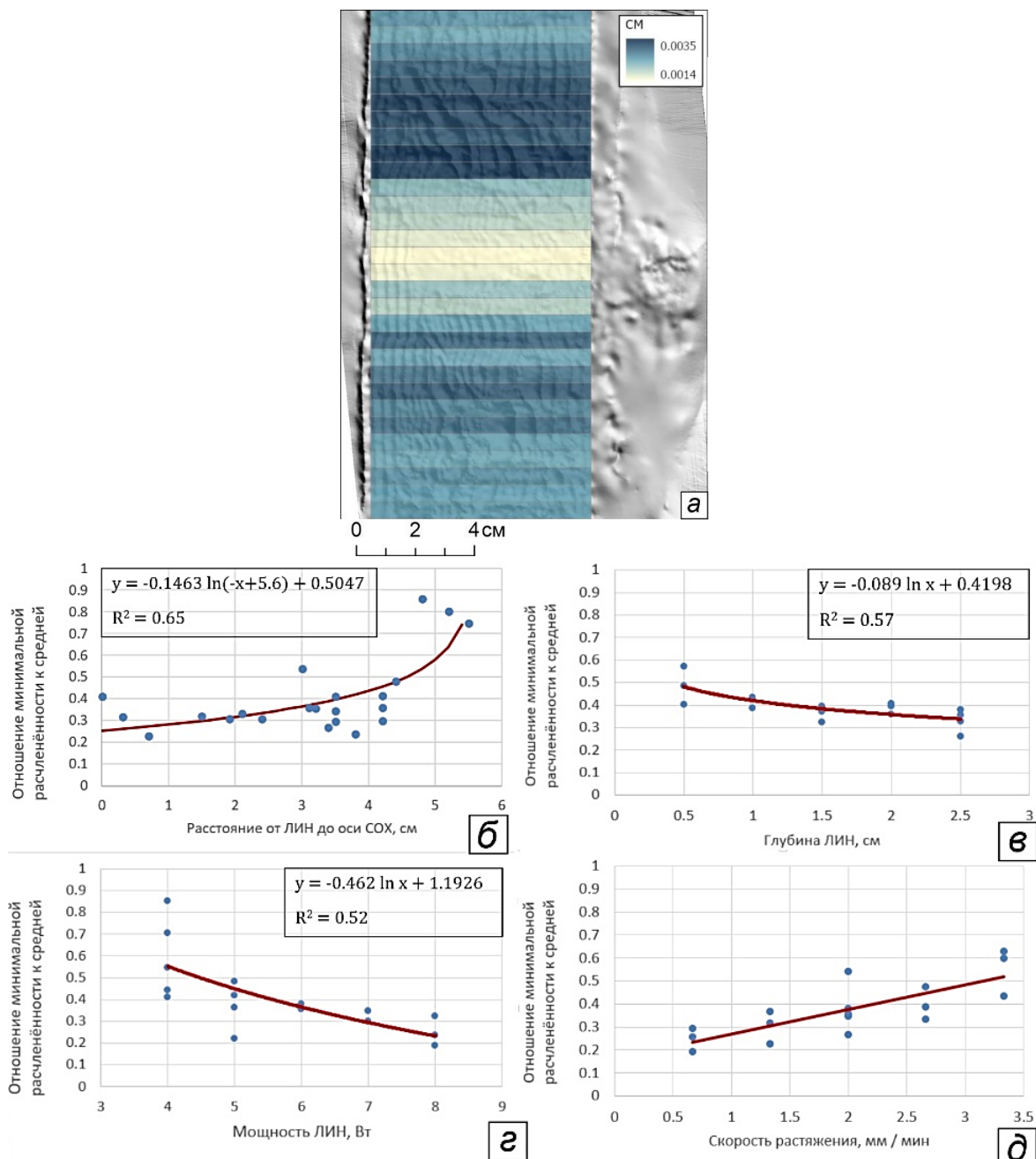


Рис. 2. Изменение относительной расчленённости в зависимости от параметров ЛИН и скорости растяжения: (а) – медианная расчленённость рельефа по ячейкам 1 см (на примере эксперимента 3042); точечные диаграммы и кривые аппроксимации зависимости относительной расчленённости от (б) расстояния от центра ЛИН до оси СОХ; (в) – глубины ЛИН от поверхности модели; (г) – мощностей ЛИН; (д) – скорости растяжения

Второй подход, вычисление важности признаков, предполагает перемешивание значений y в регрессионной модели для того, чтобы понять, на какую величину уменьшается коэффициент детерминации R^2 . При значительном уменьшении R^2 фактор имеет большое влияние на исследуемый показатель. Это также позволяет количественно оценить относительный вклад каждого фактора. При данном подходе невозможно определить положительное или отрицательное влияние фактора, в отличие от множественной линейной регрессии. Но значительным преимуществом метода является более узкий доверительный интервал, что позволяет точнее оценить вклад компонентов. В целом, оба метода имеют схожие результаты.

Результаты экспериментального моделирования в целом схожи (рис. 1). В каждом эксперименте выделяется область влияния ЛИН. В её пределах могут наблюдаться пятна расплава при близком расположении ЛИН и высокой его мощности. Рельеф осевой зоны становится значительно более мелким, крупные поперечные нарушения отсутствуют, а спрединг часто является косым относительно направления растяжения. Различия наблюдаются в размерах области влияния и степени изменений модельного хребта.

При регрессионном анализе наилучшая аппроксимация была получена при анализе зависимости относительной расчленённости от параметров ЛИН. В каждом случае коэффициент детерминации составлял не менее 0.5 (рис. 2). При этом, для удалённости ЛИН, его мощности и глубины характерны логарифмические зависимости, тогда как для скорости спрединга прослеживается линейная зависимость. Следует отметить, что при большой удалённости ЛИН, малой глубине и мощности значения относительной расчленённости могут сильно варьировать, тогда как в противоположном случае дисперсия сравнительно невелика. Вероятно, в первом случае большую роль начинают играть локальные факторы, связанные с направлением асимметрии растяжения, наличием или отсутствием крупных поперечных нарушений и локальных перескоков оси спрединга.

Менее явные зависимости прослеживаются для других показателей: длины области влияния и минимальной расчленённости. Для них также характерно преобладание логарифмических аппроксимаций для параметров ЛИН, однако могут иметь место линейные и корневые регрессионные модели. Отдельно выделяется время проявления термической аномалии на оси СОХ от запуска эксперимента. В этом случае также получается сильная корреляция между параметрами ЛИН и показателем с преимущественно логарифмическими регрессионными моделями. Однако данный показатель затруднительно соотнести с какими-либо параметрами природных плюмов.

По результатам анализа вклада параметров плюмов были получены модели множественной линейной регрессии (рис. 3). Для всех них характерны высокие значения R^2 (0.59–0.71), что свидетельствует о высокой доле объяснённой дисперсии. Вклад в длину области влияния на хребте (рис. 3а) в наибольшей степени вносит мощность источника, которая не менее чем в два раза превышает вклад остальных параметров. Удалённость от центра ЛИН и его глубина имеют приблизительно сопоставимое влияние. Скорость спрединга имеет меньшее значение, сопоставимое с доверительным интервалом, поэтому можно утверждать, что её влияние незначительно в сравнении с остальными параметрами.

Иная ситуация наблюдается для минимальной расчленённости в области влияния (рис. 3б). Здесь наибольшее, примерно сопоставимое влияние, оказывают мощность ЛИН и удалённость от оси, причём второй параметр имеет несколько большее значение. Глубина ЛИН и скорость спрединга имеют гораздо меньшее значение, оказывая отрицательное влияние минимальную расчленённость. Следует отметить, что в данном случае наблюдается наибольшая разница между результатами множественной регрессии и PFI. В первом случае оба показателя вносят существенный вклад, тогда как во втором они близки по значениям к доверительному интервалу.

Большая однозначность результатов наблюдается для относительной расчленённости (рис. 3в). Здесь результаты двух анализов численно практически равнозначны. Наибольший вклад вносят глубина и удалённость ЛИН от оси хребта. Мощность ЛИН имеет несколько меньшее (на 25%) значение. Скорость спрединга на показатель влияет в существенно меньшей степени, внося в 4-5 раз меньший вклад в сравнении с другими показателями, однако, этот вклад нельзя назвать незначительным. То есть, в отличие от самого размера области взаимодействия плюма и СОХ, рельеф и структурообразование в её пределах контролируются не столько мощностью самого плюма, сколько его удалённостью от хребта, а также глубиной возникновения. Таким образом, для плюмов различной глубинности можно ожидать формирование разных структурных ансамблей в пределах спрединговых хребтов при прочих равных показателях.

На большое значение глубины плюма на его поверхностные проявления в пределах СОХ также указывают результаты анализа для времени проявления аномалии на поверхности (рис. 3г). В этом случае глубина ЛИН, удалённость от оси и его мощность вносят примерно равный вклад с несколько большим значением глубины ЛИН, скорость спрединга также играет значительную, но меньшую роль.

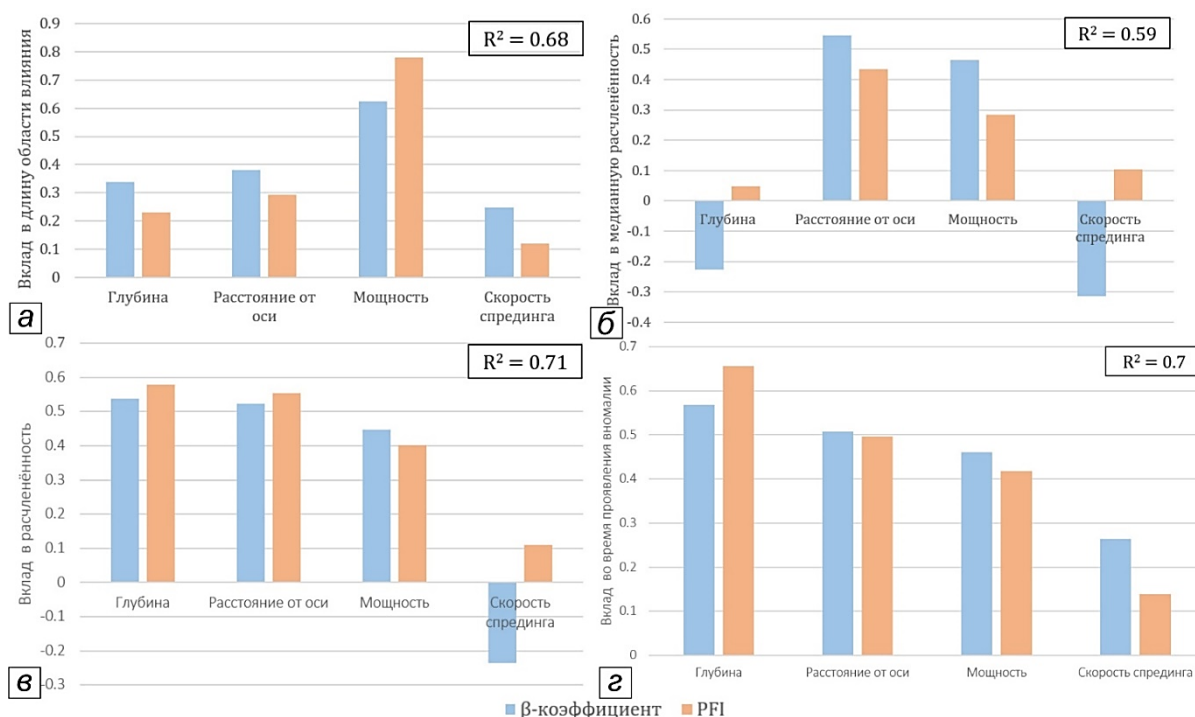


Рис. 3. Оценка вклада параметров ЛИН и скорости спрединга на характеристики рельефа модельных хребтов

Таким образом, по данным физического моделирования и последующего анализа цифровых моделей эксперимента была проведена количественная оценка вклада мантийных плюмов на формирование рельефа спрединговых хребтов в областях их взаимодействия. Наибольшую эффективность для данной оценки показали длина области влияния и относительная расчленённость. Результаты оценки по этим показателям хорошо согласуются как по методу множественной линейной регрессии, так и по методу PFI. Поэтому именно эти два показателя будут использоваться в продолжение этой работы, но уже с природными данными по рельефу областей взаимодействия СОХ и плюмов. По результатам проведённой работы было показано, что наибольшее влияние на формирование рельефа СОХ в областях взаимодействия имеют, как и предполагалось, мощность плюма и удалённость его центра от оси растяжения. Также значительное влияние оказывает глубина источника термической аномалии, что также может найти свои проявления и в природных условиях. Скорость спрединга в значительно меньшей степени влияет на рельеф и структурообразование, как следствие, они обусловлены в большей степени именно параметрами плюма, нежели характеристиками спрединга. При дальнейшей работе с природными системами также следует учитывать и асимметрию спрединга, которую невозможно корректно воспроизвести в рамках используемой физической модели, но которая, однако, может оказывать существенное влияние на структурообразование в пределах областей взаимодействия СОХ и плюмов.

Литература

1. Грохольский А.Л., Дубинин Е.П. Структурообразование в рифтовых зонах и поперечных смещениях осей спрединга по результатам физического моделирования // Физика Земли. 2010. №5. С. 49–55.
2. Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle // Earth and Planetary Science Letters. 2003. Vol.205. P. 295–308.
3. Hall P.S., Kincaid C. Melting, dehydration, and the dynamics of off-axis plume-ridge interaction // Geochem., Geophys., Geosyst. 2003. Vol.4 (9). 2003GC000567.
4. Hoggard M.J., Parnell-Turner R., White N. Hotspots and mantle plumes revisited: Towards reconciling the mantle heat transfer discrepancy // Earth and Planetary Science Letters. 2020. Vol.542. 116317.
5. Shemenda A.I., Grokholsky A.L. A formation and evolution of overlapping spreading centers (constrained on the basis of physical modelling) // Tectonophysics. 1991. Vol.199. P. 389–404.

ОБЗОР ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КРЫМСКОГО РЕГИОНА

Бондарь И. В.¹

¹ – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; bond@ifz.ru

В рамках работ по Госзаданию лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН по теме «Создание тектонофизической и геомеханической моделей коры и литосферы Крыма и Северного Причерноморья» возникла потребность в анализе работ предшественников, посвященных изучению палеонапряжений в пределах Горного Крыма. Результатом анализа стал данный обзор, который может быть полезен широкому кругу геологов.

Все проанализированные работы можно разделить на две группы. К первой группе отнесены региональные исследования, охватывающие всю или почти всю территорию республики Крым и которые явились следствием обработки большого количества исходных (в том числе полевых) данных. Ко второй группе отнесены локальные исследования, которые посвящены изучению небольшого участка, например, небольшого разлома, или даже одного обнажения. Описание работ будет проводиться в хронологическом порядке в зависимости от года публикации.

Региональные исследования. Наиболее ранней работой является глава из книги «разломы и горизонтальные движения горных сооружений СССР» Расцветаева Л.М. [1977]. С помощью анализа геологического строения, кинематики разломов, положения структур, складок, а также пространственной ориентировки зеркал скольжения получены следующие результаты. Альпийская структура Горного Крыма сформировалась под решающим влиянием тангенциального сжатия северо-северо-западного направления (330°). Это общее сжатие, определяющее основное поле напряжений Горного Крыма в позднеальпийское время, действовало на всю глубину земной коры. Фиксируются также отчетливые следы и субмеридионального сжатия, отразившегося в субширотной ориентировке некоторых линейных складок, в сбросо-раздвиговых движениях по швам субмеридионального направления и в формировании сетки сопряженных сколовых трещин с субмеридиональной осью скалывания. По мнению Расцветаева Л.М. поле напряжений, вероятно, играло существенную роль лишь на ранних стадиях альпийского развития региона.

В работе [Горайнов, 2013] анализируются новообразованные тектониты ларамийского (палеоценовые) и аттического (послемиоценовые – доплиоценовые) возраста. По данным автора в кайнозойе ларамийские складчато-разрывные деформации имеют север-северо-западную вергентность, а аттические складчато-разрывные деформации северо-восточной вергентности нарастают к западу (к Карпатам) и югу (к Крыму).

Коллектив авторов во главе с Гинтовым О.Б. [Муровская, 2012; Gintov et al, 2013; Муровская, 2014] проанализировали огромный фактический материал (2000 замеров пространственной ориентировки зеркал скольжения) и с помощью комплексного подхода, объединяющего кинематический и структурно-парагенетический методы полевой тектонофизики, получили следующие результаты. Получено от одного до четырех положений главных осей, отвечающих различным деформационным режимам и фазам деформации. Наиболее проявлены сдвиговые поля с ориентировкой оси сжатия вдоль простирания Горного Крыма (рис. 1).

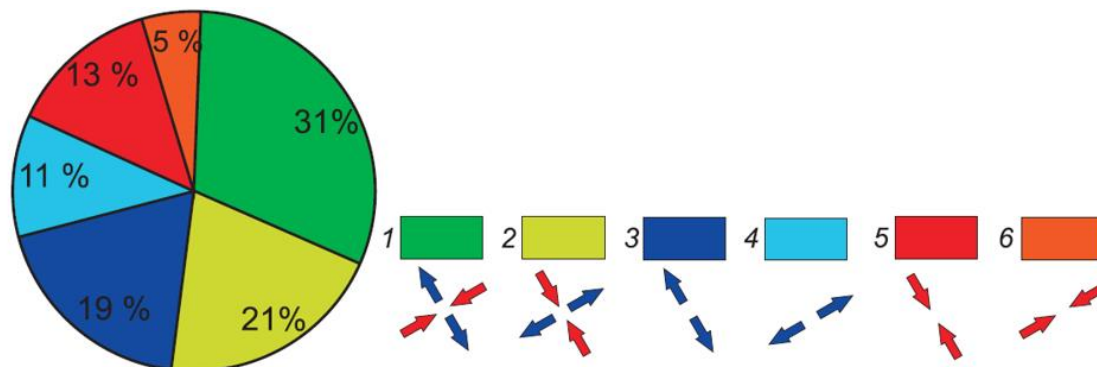


Рис. 1. Гистограмма типов полей напряжений [Гинтов и др., 2013]: 1 – сдвиговый тип №1; 2 – сдвиговый тип №2; 3 – сбросовый тип №1; 4 – сбросовый тип №2; 5 – взбросовый тип №1; 6 – взбросовый тип №2

Вторыми по представительности являются сдвиговые поля с осями сжатия, ориентированными вкрест простирания Горного Крыма. Густая сеть наблюдений позволила построить карты изолиний главных нормальных напряжений для каждой из выделенных групп полей напряжений. Также построены карты касательных напряжений – оси сжатия и растяжения просто меняются местами, а траектории максимальных касательных напряжений остаются в одном положении, движение по разломам в таком случае реверсное.

Гончар В.В. [2017], используя принцип разделения хрупких деформаций на до- и послескладчатые в рамках кинематического метода Гущенко О.И., получил характеристики поля напряжений на различные районы Горного Крыма. В пределах Восточно-Крымского синклинория преобладают сдвиговые и сбросовые поля напряжений. В его северо-западной части ориентировки оси сжатия соответствуют северо-северо-западному и субмеридиональному направлениям, на востоке проявляется западно-северо-западное направление наряду с северо-западным, что может говорить о двух этапах сжатия. В пределах Судакско-Карадагской зоны определяются послескладчатые обстановки северо-западного сжатия. В пределах Судакского синклинория преобладают обстановки растяжения над сжатием, доминирует послескладчатое сбросовое поле субмеридионального растяжения. Также по данным автора направление субмеридионального и северо-западного сжатия относится к молодому полю напряжений, связанному с формированием завершающей складчатости восточного Горного Крыма.

В докторской диссертации Вольфмана Ю.М. [2020], посвященной особенностям процессов альпийского тектонического разрывообразования и сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона, большое внимание уделено тектонофизическим исследованиям. Полевыми наблюдениями охвачены разновозрастные комплексы значительной части территории Горного Крыма. Всего обследовано более 250 пунктов наблюдений, в которых замерено около 2600 зеркал скольжения и порядка 3700 трещинных структур без видимых следов перемещений вдоль них. Используемые в данной работе приемы обработки зеркал скольжения автор относит к категории методов структурного анализа. По своему алгоритму эти приемы близки одному из видов анализа напряжений на основе совмещения разных подходов, обозначенного Ю.Л. Ребецким [Ребецкий и др., 2017].

Результаты, полученные в работе, следующие. Большая часть разломов – субвертикальная, движения по ним в основном сдвиговые. Основная роль принадлежит взаимно-перпендикулярным тектоническим разрывам (L-сколам) диагональных направлений: северо-восточного ($35-40^\circ$) и северо-западного ($305-310^\circ$). Сдвиговые деформационные режимы играли доминирующую роль в процессах альпийского и новейшего тектонического разрывообразования в Горном Крыму: присутствуют субширотное, субмеридиональное, СВ и СЗ сжатие. Помимо сдвиговых деформационных режимов, выделяются менее проявленные взбросо-сдвиговые, сбросо-сдвиговые, сбросовые, взбросовые и взбросо-сбросовые. В построенных моделях деформационных режимов проекции осей сжатия σ_1 и растяжения σ_3 для соответствующих кинематических условий характеризуются секторальным распределением, то есть группируются на стереограммах в пределах четырех пар узких диаметрально противоположных секторов меридиональной, субширотной и диагональных ориентировок. Перечисленные парные максимумы σ_1 и σ_3 характеризуют одну из важнейших особенностей первичного поля тектонических напряжений – взаимную переориентировку осей главных напряжений, которая может происходить как за сравнительно короткое время, так и в течение длительных периодов.

Локальные исследования. Локальные исследования, как уже было сказано выше, направлены на изучение какой-то отдельной структуры или даже одного обнажения, как, например, в работе Тевелева Арк.В. с соавторами [Тевелев и др., 2013]. Изучалось обнажение Донузоранского складчатого комплекса – смятых в складки турбидитов триасово-юрской таврической серии в Бахчисарайском районе, в нижней части правого склона долины р. Бодрака. Основным методом изучения стал геометрический анализ структуры складок. Он заключался в выяснении закономерностей пространственной ориентировки основных элементов складок, изучении рисунка изогон и радиусов кривизны замков складок, а также в выяснении структурного контроля мощностей слоев в разных элементах комплекса. Для анализа структурных элементов складок использовались замеренные в поле элементы пространственной геометрии складок – элементы залегания крыльев складок и их шарниров, которые наносились на стереографическую сетку; для анализа использовалась верхняя полусфера. Для плоскостных элементов были определены и зафиксированы на сетке ориентировки нормалей к поверхностям пластов. Также были отмечены проекции пересечений линейных элементов (шарниров складок) с верхней полусферой. Подробное описание анализа см. в работе [Тевелев и др., 2013].

На основе анализа создана модель формирования складок. На моделях показаны структурная ассоциация складок доузоранского типа (рис. 2А) и предполагаемые поля напряжений, под воздействием которых образовалась наблюдаемая в настоящее время структура (рис. 2Б). Главная ось сжатия имеет ориентировку запад- юго-запад 250° – восток- северо-восток 70° . Существенную роль в строении модельной складки Донузоранского комплекса имеют сколовые деформации, которые, соответственно их положению в структуре, соотносятся с набором риделевских сдвигов R, R', P и Y, образующихся в обстановке простого сдвига за счет касательных напряжений.

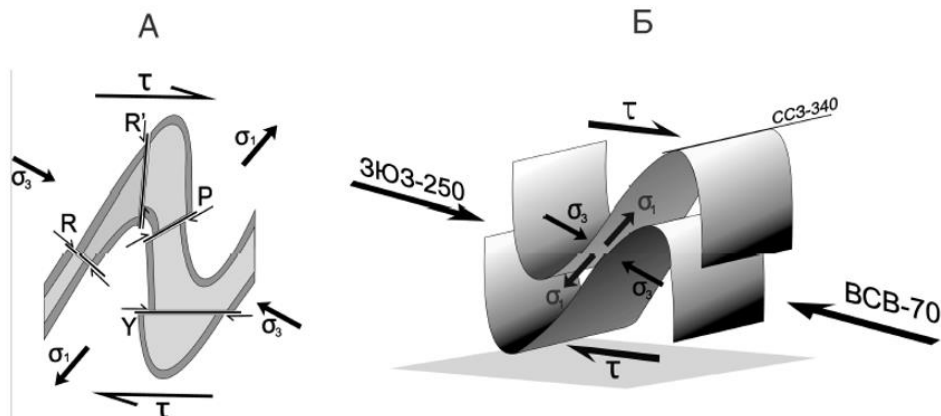


Рис. 2. Структурные модели складок Донузоранского складчатого комплекса [Тевелев и др., 2013]: (А) – структурный парагенез модельной складки комплекса; (Б) – предполагаемая ориентировка осей главных нормальных (σ) и тангенциальных (t) напряжений. t – оси касательных напряжений, σ_3 – ось главного сжатия, σ_1 – ось главного растяжения; промежуточная ось σ_2 расположена горизонтально и нормально к плоскости осей σ_3 и σ_1 (не показана); сколовые структуры: R – синтетические сколы Риделя, R' – антитетические сколы Риделя, P-P-сколы, симметричные синтетическим сколам Риделя, Y – главные сколы

В работе [Курдин, Тверитинова, 1997] авторы изучали Качинское поднятие (Бахчисарайский район) с помощью структурно-парагенетического метода Расцветаева Л.М. В киммерийских и в посткиммерийских образованиях выявлены две тектодинамические обстановки, определившие особенности структурных рисунков трещиноватости. Одна из них характеризуется тангенциальным северо-западным сжатием и предпочтительным близгоризонтальным северо-восточным растяжением, другая – близгоризонтальным субмеридиональным сжатием и близгоризонтальным субширотным, а иногда субвертикальным растяжением. Обстановка северо-западного сжатия фиксируется повсеместно и в структурах разного масштабного уровня (трещины, локальные разрывы и складки, крупные зоны концентрации деформаций). Иная геодинамическая обстановка, вызванная тем же самым северо-западным сжатием, отражена в породах киммерийского складчатого основания. Здесь, наряду с системами сдвигов и отрывов Главного структурного парагенезиса трещин, весьма широко развиты взбросы северо-восточного направления и пологие (до горизонтальных) отрывно-жилые тела, свидетельствующие о преимущественно субвертикальном положении оси растяжения.

Коллектив авторов во главе с Лыгиной Е.А. [Лыгина и др., 2022] исследовали мел-эоценовые отложения в окрестностях г. Бологурска. В результате анализа трещиноватости структурно-парагенетическим методом Расцветаева Л.М. выявлено, что трещины в меловых породах закономерно связаны с падением и простираемостью моноклинали. Их формирование происходило на фоне неравномерного общего воздымания территории при главном северо-западном латеральном сжатии поперек моноклинали; воздымание сопровождалось поперечным растяжением и формированием структур отрывного типа вплоть до кластических даек. Трещины, замеренные в вышележащих эоценовых отложениях, вписываются в единую систему общей трещиноватости.

С помощью этого же метода была изучена серия обнажений г. Чуфут-Кале (Бахчисарайский район) Фокиным П.А. [Фокин, 2023]. Автором зафиксировано и подробно описано множество интересных дизъюнктивных нарушений, в том числе 20 зеркал скольжения.

По мнению автора, возраст описанных дизъюнктивных структур может определяться только опосредованно. Они нарушают верхнемеловые отложения и с теми же ориентировками дешифрируются на поверхности плато г. Чуфут-Кале, в известняках датского яруса. Весь набор дизъюнктивов сформирован в течение альпийского этапа, наиболее вероятно – вовремя воздымания Горного Крыма, начавшегося в конце миоцена.

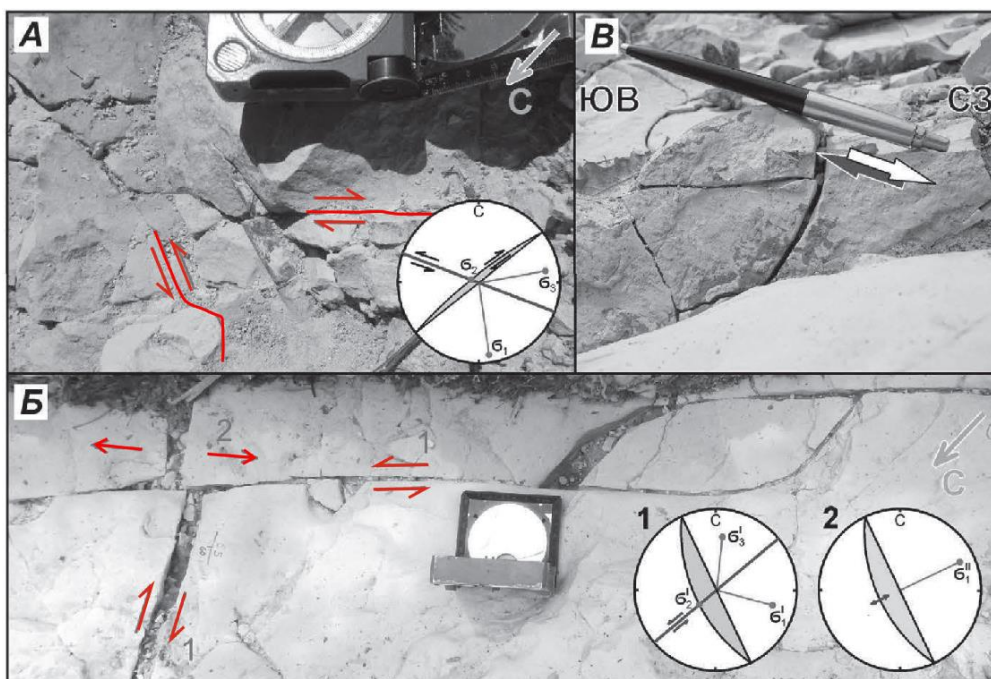


Рис. 3. Парагенезы разрывных структур и восстановление условий их формирования (фрагмент рисунка) [Фокин, 2023]. В круглых врезках – реконструкции полей напряжений на сетке экваториальной равноугольной проекции верхней полусферы; ориентировки: σ_1 – максимального растяжения, σ_2 – промежуточных напряжений, σ_3 – максимального сжатия; римские цифры в надстрочном индексе – стадии деформации. (А) – пункт 1, (Б) – пункт 2, (В) – пункт 3; арабскими цифрами обозначены стадии деформации; арабскими цифрами в подстрочном индексе при обозначении трещин модели Риделя – стадии деформации

Наиболее четко выделяются субмеридиональные до северо-западных ориентировки оси максимального сжатия ($S3-345^\circ - CCB-10^\circ$) и в меньшей степени – субширотные ($BCB-80^\circ - ZC3-280^\circ$). Субмеридиональное сжатие в достоверных случаях расшифровки суперпозиции парагенезов оказываются моложе субширотного. Северо-западное сжатие на изученном участке проявлено реже и только в трещинных парагенезах, но его структуры иногда наложены на парагенезы субмеридионального сжатия. Эти две группы ориентировок образуют основную часть задокументированных структур. С точки зрения автора они доминировали в процессе образования позднеальпийской структуры Горно-крымского мегантиклинория и Качинского антиклинория в частности.

Качинское поднятие (Бахчисарайский район) исследовалось также коллективом авторов во главе с Коротаевым М.В. [Коротаев и др., 2024]. Замеры трещин проводились на восточной окраине г. Бахчисарай и в с. Староселье, в датских и верхнеипрско-нижнелютетских отложениях вдоль Бодракского разлома. Всего сделано 20 точек наблюдений, 476 замеров. Практически все выявленные зеркала скольжения сдвиговые. Наиболее проявленными оказались трещинные парагенезы с северо-восточной ориентировкой оси главного сжатия, что объясняется влиянием Бодракского разлома. Взбросо-левосдвиговые смещения по Бодракскому разлому на северо-востоке косвенно подтверждаются приразломными деформациями и по аналогии с левосдвиговыми смещениями разломов СВ простирания. Такие смещения у разлома СВ простирания будут реализовываться при сжатии в северных румбах. На изгибе левого сдвига от северо-восточного простирания к широтному, субмеридиональное сжатие должно привести к возникновению транспрессии, с локальной переориентировкой сжатия на северо-восточное, которое в основном и зафиксировалось в трещиноватости компетентных палеогеновых пород в районе Бахчисарая.

Выводы. Таким образом, на основании анализа работ многолетних тектонофизических исследований Крымского региона, можно сделать следующие выводы:

В пределах Крымского региона реконструируют четыре разновозрастных поля напряжений с ориентировкой оси максимального сжатия в северо-западном, северо-восточном, субширотном и субмеридиональном направлениях.

Наиболее проявлены два поля напряжений – сдвиговые, с ориентировкой оси максимального сжатия в северо-западном и северо-восточном направлениях.

Существенно преобладает сдвиговый тип напряженного состояния. Намного реже реконструируется взбросовый и сбросовый тип напряженного состояния.

Данные об относительном возрасте полей напряжений противоречивы, однако большинство авторов сходится во мнении, что наиболее молодое поле напряжений – сдвиговое, с северо-западной ориентировкой оси максимального сжатия.

Выявлена важная особенность главных (наиболее проявленных) полей напряжений – взаимная переориентировка осей главных напряжений, которая может происходить как за сравнительно короткое время, так и в течение длительных периодов.

Локальные исследования выявили неоднородности напряженного состояния, связанные с активностью небольших структур (например, Бодракский разлом).

Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания ИФЗ РАН FMWU-2025-0036 «Создание тектонофизической и геомеханической моделей коры и литосферы Крыма и Северного Причерноморья».

Литература

1. *Вольфман Ю.М.* Особенности процессов альпийского тектонического разрывообразования и сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона // Диссертация на соискание ученой степени доктора геол.-мин. наук. Симферополь. 2020.
2. *Гончар В.В.* Разновозрастные поля напряжений Восточного Крыма // Геофизический журнал. 2017. №1. Т.39. С. 61–78.
3. *Горайнов С.В.* Кайнозойские тектонические движения Восточной Европы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2013. №3 (33). С. 55–65.
4. *Коротаев М.В., Правикова Н.В., Фокин П.А., Тверитинова Т.Ю., Чижова Е.Р., Кизяков А.И., Лыгина Е.А.* Геомеханическое моделирование трещиноватости разреза горы Сувлу-Кая, Юго-Западный Крым // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. №2. С. 23–31.
5. *Курдин Н.Н., Тверитинова Т.Ю.* Тектодинамические условия формирования альпийской структуры Качинского поднятия Горного Крыма / в кн. Очерки геологии Крыма / Труды Крымского геологического научно - учебного центра им. проф. А.А. Богданова. Вып. 1. М.: изд. геол. ф-та МГУ. 1997. С. 131–151.
6. *Лыгина Е.А., Правикова Н.В., Чижова Е.Р., Тверитинова Т.Ю., Яковишина Е.В., Никишин А.М., Коротаев М.В., Тевелев А.В., Краснова Е.А., Косоруков В.Л., Самарин Е.Н.* Эоценовая сейсмичность и палеогеография Центрального Крыма // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. №5. С. 68–77.
7. *Муровская А.В.* Деформации верхнемеловых отложений Юго-Западного Крыма // Геофизический журнал. 2014. №6. Т.36. С. 79–92.
8. *Муровская А.В.* Напряженно-деформированное состояние Западного Горного Крыма в олигоцене // Геофизический журнал. 2012. №2. Т.34. С. 109–119.
9. *Расцветаев Л.М.* Горный Крым и Северное Причерноморье. Разломы и горизонтальные движения горных сооружений СССР. М.: Наука. 1977. С. 95–113.
10. *Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В.* От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. М.: ГЕОС. 2017. 225 с.
11. *Тевелев Арк.В., Шмонова Е.А., Тевелев Ал.В.* Морфология и условия формирования нижнеюрского складчатого комплекса Донузоран // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. Геол. 2013. Т.88. Вып.6. С. 24–41.
12. *Фокин П.А.* Системы дизъюнктивных нарушений в верхнемеловых породах на северо-восточном склоне плато Чуфут-Кале (Бахчисарайский р-н, Крым) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. №3. С. 22–30.
13. *Gintov O.B., Murovskaya A.V., Mychak S.V.* Field tectonophysics in solutions of geodynamic evolution problems of the Ukraine territory // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. Vol.4 (3). P. 281–299.

К СОЗДАНИЮ МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНОЙ ПЛАТФОРМЫ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Гайдаленок О. В.¹, Сысолин А. И.², Пулинец С. А.³, Сеспед А.⁴, Тосо С.⁵, Браво М.⁶

¹ – Независимый исследователь, г. Москва, Россия; *ogaidalenok@gmail.com*

² – DMT Geosciences Ltd. (ДМТ Геосайенсэс Лтд.), г. Калгари, Канада

³ – Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

⁴ – Национальный институт им. Андреса Бэйо, г. Сантьяго де Чили, Чили

⁵ – Технический университет им. Федерико Санта Марии, г. Вальпараисо, Чили

⁶ – Адвентистский Университет Чили, Центр научноприборного обеспечения, г. Чийан, Чили

Краткосрочный прогноз землетрясений остаётся одной из самых трудных задач геофизики. Накопленные наблюдения показывают, что за дни–недели до сильных событий ($M_w \geq 6-7$) в литосфере, атмосфере и ионосфере возникают короткоживущие аномалии, связанные с подготовкой очага [Pulinets, 1998; Pulinets et al., 2015; De Santis et al., 2025]. Эти аномалии рассматриваются как единый «каскад предвестников», отражающий приближение системы к неустойчивому состоянию.

Раньше каждая дисциплина смотрела только «своё»: геология – активные разломы и кинематику смещения, сейсмология – форшоки и эволюцию b -параметра, радиофизика – ионосферные отклонения ТЕС (Total Electron Content), дистанционное зондирование – тепловые аномалии и выбросы длинноволнового излучения OLR (Outgoing Longwave Radiation) [Ouzounov et al., 2007; Ouzounov et al., 2018; Cianchini et al., 2024]. Сейчас формируется мультипараметрический подход [Pulinets, 2023; De Santis et al., 2025]: важен не один «универсальный предвестник», а одновременное появление независимых аномалий в разных средах. Совпадение таких сигналов трактуется как индикатор выхода разломной зоны в критическое состояние.

Показано, что интенсивность предвестников со временем возрастает ускоренно (степенной или экспоненциальный закон), что согласуется с идеей критического приближения к разрыву [Cianchini et al., 2024; Zhang et al., 2024]. Последовательность тоже не случайна: сначала проявляются литосферные признаки нагружения (форшоки, снижение b -параметра, эпизоды медленного скольжения), затем возникают атмосферно-тепловые и ионосферные эффекты [Socquet et al., 2017; De Santis et al., 2025].

Цель работы – представить прототип мультипараметрической платформы мониторинга предвестников для зоны субдукции в Чили и обсудить сопоставление разных типов аномалий с крупнейшими событиями региона (Мауле 2010, M_w 8.8; Икике 2014, M_w 8.2; Вальдивия 1960, M_w 9.5).

Цели и постановка задачи. В проекте решаются две задачи:

1. Научно-диагностическая:

- Сопоставить поведение краткосрочных предвестников (атмосферных, ионосферных, магнитных, геодезических, сейсмических, геохимических) перед крупными землетрясениями Чили;
- Понять, почему разные события дают разные комбинации сигналов (например, различия между Мауле 2010 и Икике 2014);
- Оценить вклад внешних факторов (космическая погода, метеоусловия, вулканизм), способных имитировать предвестники и давать «ложные тревоги», не связанные с реальной подготовкой очага.

2. Технологическая

- Создать прототип автоматизированной платформы сбора и визуализации разнотипных данных в режиме, близком к оперативному;
- Реализовать автоматическое выделение аномалий по ключевым параметрам (падение влажности/точки росы, всплески OLR, отклонения ТЕС, вариации магнитного поля, ускорение смещений GPS (Global Positioning System), снижение b -параметра и т.д.) и проверку их согласованности во времени;
- Сформировать основу для полуоперативного предупреждения о входе системы в «каскадную фазу» подготовки события [De Santis et al., 2025].

Задача не сводится к поиску «одного предвестника». Цель – фиксировать момент, когда разломная зона переходит в динамически неустойчивое состояние и вероятность сильного толчка резко возрастает в горизонте дней–недель.

Отдельно подчёркивается необходимость круглосуточной мультидисциплинарной платформы мониторинга 24/7, интегрирующей такие каналы в едином интерфейсе. Концептуально подобный центр непрерывного наблюдения за сейсмической опасностью рассматривался в своё время Е.А. Рогожиным (район Мосрентгена) как связка геофизических, геодезических, электромагнитных и геохимических наблюдений в одном ситуационном зале. Идеологически предлагаемая нами система в Чили продолжает эту линию.

Исходные данные и методика. Платформа объединяет несколько независимых классов наблюдений:

1. Атмосферные параметры и АСР. Перед крупными землетрясениями отмечаются характерные изменения приземного слоя: рост температуры, падение относительной влажности и точки росы, локальные тепловые аномалии [Pulinets, 2023]. Для описания такого состояния используется параметр АСР (Atmospheric Chemical Potential), чувствительный к ионизации воздуха радоном, выделяющимся по активизирующимся разломам [Cigolini et al., 2014; Pulinets, 2023] (рис. 1). Анализируются влажность, температура и точка росы (реанализ ERA5, спутниковые и наземные данные) в окрестности будущих эпицентров.

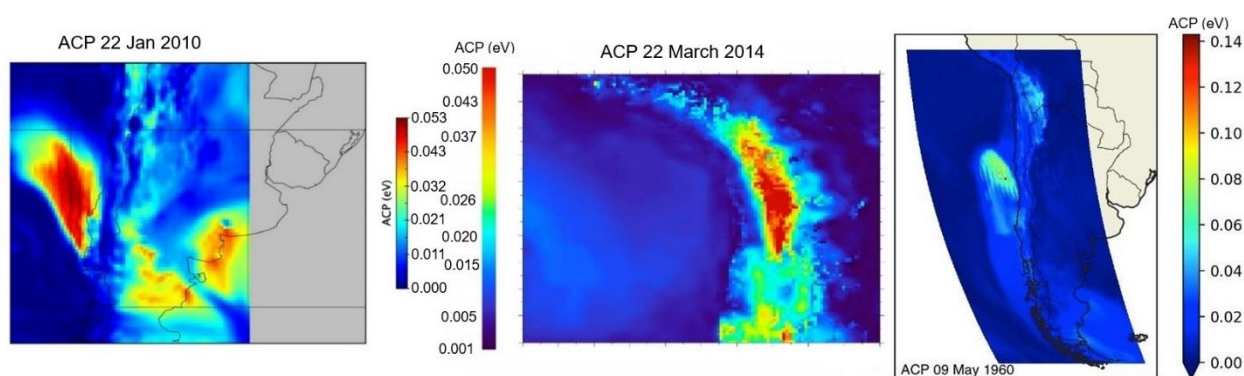


Рис. 1. Карты АСР для землетрясений: Мауле, 2010 (слева) – за 37 дней до события; Икике, 2014 (в середине) – за 11 дней; Вальдивия, 1960 (справа) – за 14 дней (построено С. Тосо)

2. OLR (Outgoing Longwave Radiation). OLR отражает энергетический баланс системы «поверхность–тропосфера–облачность». Для чилийских событий описаны положительные аномалии OLR за ~2–3 недели до толчка, трактуемые как усиленный локальный тепловой поток из зоны подготовки разлома [Ouzounov et al., 2007; Ouzounov et al., 2018]. Мы сравниваем суточные поля OLR с многолетней «климатической нормой» той же даты, чтобы выделить статистически значимые отклонения.

3. Ионосфера (TEC, foF2). TEC (суммарное содержание электронов) иногда демонстрирует отклонения за 5–15 дней до события. Для Икике 2014 г. (Mw 8.2) показано, что часть сигналов TEC не объяснялась магнитными бурями [Guo et al., 2015]. Используются данные международных и чилийских GNSS-сетей и ионозонд, с учётом индексов космической погоды.

4. Магнитное поле (наземные и спутниковые данные). По наземным станциям сообщались вариации амплитуд порядка единиц–десятков нТл за часы до умеренных и сильных событий [Ruiz et al., 2011; Agesso et al., 2023]. Орбитальные миссии (Swarm, CSES-01) регистрируют аномалии магнитного поля и параметров плазмы за дни–недели до крупных землетрясений; устойчивость подхода проверяется, в т.ч. для Альпийско–Гималайского пояса [Alimoradi et al., 2024; Cianchini et al., 2024]. В Чили сеть наземных магнитометров разрежена, поэтому комбинируются наземные и спутниковые данные.

5. Геодезия (GPS/GNSS). Перед мегаземлетрясениями фиксируются ускорение асейсмического скольжения и согласованное перераспределение векторов горизонтальных смещений. Перед Тохоку-Оки 2011 г. отмечено усиление и упорядочивание смещений станций за считанные дни до главного толчка [Kamiyama et al., 2012] (рис. 2). Для Икике 2014 г. длительное медленное скольжение на границе субдукции наблюдалось за ~8 месяцев до события, сопровождаясь перестройкой форшоковой активности [Socquet et al., 2017]. В прототипе планируется автоматический сбор GPS-временных рядов вдоль чилийской зоны субдукции и поиск признаков ускорения и согласованности векторов.

6. Сейсмичность и b -параметр. Падение b -параметра (<1) трактуется как рост доли относительно крупных событий и накопление напряжения. Для землетрясения Лудин (Ms 6.8, Китай, 2022 г.) показано устойчивое снижение b вплоть до главного толчка [De Santis et al., 2025; Zhang et al., 2024].

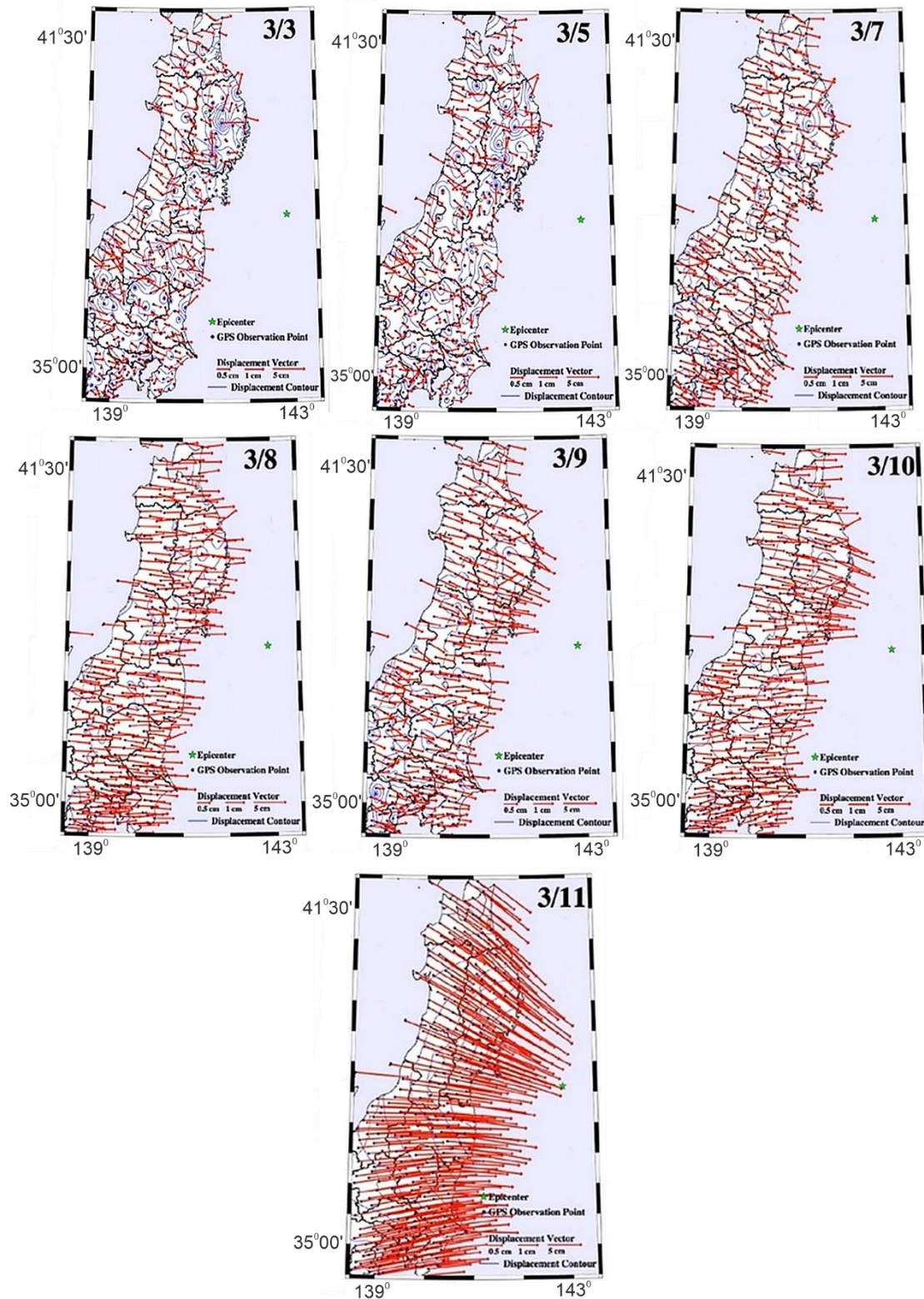


Рис. 2. GPS-векторы до и во время землетрясения Тохоку-Оки, 2011 [Kamiyama et al., 2012]

7. Геохимия (радон). Выброс радона по активным разломам давно рассматривается как краткосрочный предвестник. Для Л'Аквилы (2009 г.) зарегистрированы всплески радона в скважинных станциях вблизи активного разлома [Cigolini et al., 2014]. В Чили постоянные радоновые станции пока редки, поэтому АСР используется как прокси радоновой эмиссии.

Техническая реализация. Прототип реализуется на Python и должен автоматически собирать данные из перечисленных каналов, выделять статистические аномалии и помечать их во времени относительно момента землетрясения. Ключевой шаг – не только обнаруживать отдельные аномалии, но и фиксировать их синхронное появление (каскад). Это рассматривается как триггер для оперативного предупреждения. Платформа мыслится как постоянно работающая (24/7), с единым ситуационным интерфейсом и базой накопленных аномалий, аналогично проектам круглосуточных центров наблюдения, которые ранее обсуждались в российской практике мониторинга сейсмоопасных зон (Е.А. Рогожин, Мосрентген).

Уже существуют системы, близкие по духу к этому подходу. Платформа SeisGuard – это программная система для прогноза землетрясений, которая автоматически собирает, хранит и анализирует разнотипные предвестниковые данные в единой временной шкале [Liu et al., 2023]. В неё входят геодезические и деформационные параметры (смещения и напряжённость в коре), поведение подземных флюидов и гидрогеологические сигналы, электромагнитные и геомагнитные аномалии у поверхности, а также ионосферные возмущения плазмы по спутниковым данным (например, CSES). Все эти каналы ложатся в общий ГИС-интерфейс вместе с разломами, станциями наблюдений и каталогом сейсмичности, так что система может отмечать зоны, где сразу несколько независимых аномалий возникают одновременно, интерпретируя это как фазу подготовки разлома. Такой подход был продемонстрирован на случае землетрясения Мэньюань (MS 6.9, 8 января 2022 г.) как прототип оперативного предупреждения. Это подтверждает реализуемость круглосуточного мультипараметрического мониторинга в реальном времени.

Обсуждение и текущий статус. Литературные данные по Чили показывают, что крупные землетрясения дают разные комбинации предвестников:

- Мауле 27.02.2010 (Mw 8.8): выраженные тепловые и атмосферные аномалии, включая всплески OLR примерно за 2–3 недели до события [Ouzounov et al., 2018];

- Икике 01.04.2014 (Mw 8.2): длительное медленное скольжение на границе субдукции за месяцы до события, перестройка форшоков и ионосферные отклонения TEC за 15–5 дней до главного толчка [Guo et al., 2015; Socquet et al., 2017];

- Вальдивия 22.05.1960 (Mw 9.5): ретроспективно восстанавливаются крупномасштабные атмосферно-тепловые аномалии и признаки усиленного теплового потока за ~2 недели до события, что согласуется с моделью радон-индуцированных эффектов и концепцией LAIC (Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere coupling) [Pulinets, 2023; De Santis et al., 2025].

Доминирующие предвестники предположительно зависят от геодинамики конкретного сегмента субдукции (геометрии контакта плит, распределения сцепления, роли флюидов). В одних случаях ведущую роль играют теплово-атмосферные и электромагнитные эффекты, в других – геодезия и форшоки. Универсального «единого» признака нет. Практически это означает, что система мониторинга должна быть мультипараметрической и регионально адаптированной, а не опираться на один индикатор [De Santis et al., 2025].

При этом остаётся принципиальная физическая проблема. Предвестники фиксируют состояние среды «перед разрывом», но до сих пор не существует общепринятой модели, которая однозначно описывает сам очаг землетрясения и природу высвобождаемой сейсмической энергии на микроуровне. Классическая картина «разрядки накопленной упругой энергии» на разломе – это, по сути, макроскопическая аппроксимация поведения массива. В качестве альтернативы обсуждается модель Деформационного взрыва, согласно которой сейсмическая энергия не является заранее накопленной «упругой энергией деформаций» в породе (Бычков, 2018). Землетрясение трактуется как резкий переход электронов в кристаллической решётке пород между энергетическими состояниями под действием изменения горного давления. Электронные оболочки сжимаются или разгружаются, электрон перескакивает на другой уровень и отдаёт квант энергии, который высвобождается как сейсмический удар.

Необходимо учитывать влияние мантии, которая, как мы помним, по объёму и массе доминирует в строении Земли и определяет общий режим нагружения литосферы (рис. 3).

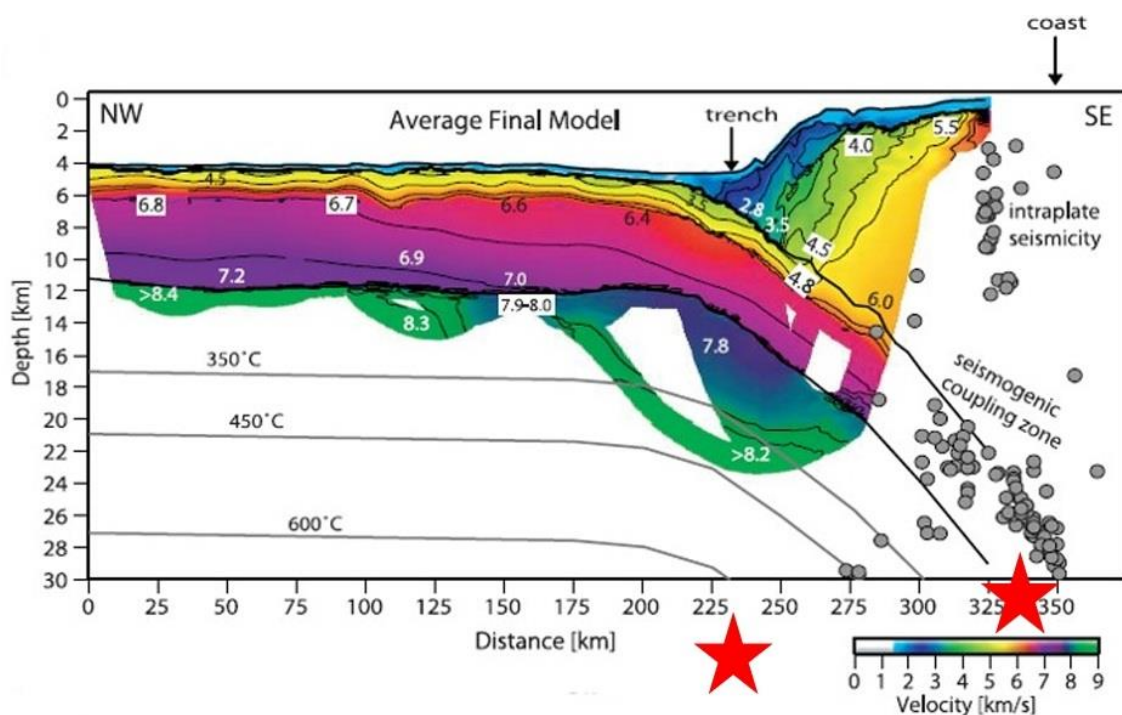


Рис. 3. Приблизительное положение очагов Мауле 2010 (слева) и Вальдивии 1960 (справа); интерпретация геофизического профиля по [Contreras-Reyes et al., 2008]

Практически это означает следующее. Мультипараметрический мониторинг атмосферы, ионосферы, магнитного поля, геодезических смещений и сейсмичности уже сегодня способен давать оперативные предупреждения. Но для того, чтобы прогноз был не только эмпирическим, но и физически обоснованным, необходимо параллельно решить фундаментальный вопрос о природе очага и механизме генерации сейсмической энергии. Иначе мы будем уметь фиксировать опасную фазу, но не объяснять сам процесс. Когда эта связка будет замкнута – от физики очага до каскада предвестников – прогноз станет не просто статистикой аномалий, а полноценной физической задачей, решаемой в реальном времени.

Литература

1. Бычков С.В. Прогноз землетрясений, плохие новости... // Вестник. 2018. №2. С. 80–86.
2. Alimoradi H., Rahimi H., De Santis A. Successful Tests on Detecting Pre-Earthquake Magnetic Field Signals from Space // Remote Sensing. 2024. Vol.16. Article 2985. P. 1–16.
3. Arecco M.A., Larocca P.A., Oreiro F.A., Fiore M.E., Otero L.A., Canero M.F. Disturbances in the geomagnetic field, water level and atmospheric pressure associated with $M_w \geq 6.6$ earthquakes in the South Atlantic Ocean // Geofísica Internacional. 2023. Vol.2. No.3. P. 543–561.
4. Cianchini G., Calcara M., De Santis A., Piscini A., D'Arcangelo S., Fidani C., Sabbagh D., Orlando M., Perrone L., Campuzano S.A. et al. The Preparation Phase of the 2023 Kahramanmaraş (Turkey) Major Earthquakes from a Multidisciplinary and Comparative Perspective // Remote Sensing. 2024. Vol.6. Article 2766. P. 1–31.
5. Cigolini C., Laiolo M., Coppola D. The LVD signals during the early-mid stages of the L'Aquila seismic sequence and the radon signature of some aftershocks of moderate magnitude // Journal of Environmental Radioactivity. 2014. Vol.39. P. 56–65.
6. Contreras-Reyes E., Grevemeyer I., Flueh E.R., Reichert C. Upper lithospheric structure of the subduction zone offshore of southern Arauco peninsula, Chile, at 38°S // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol.13. Article B07303. P. 1–19.
7. De Santis A., Cianchini G., Perrone L., Soldani M., Rahimi H., Alimoradi H. Foundations for an Operational Earthquake Prediction System // Geosciences. 2025. Vol.5. Article 69. P. 1–21.
8. Guo J., Li W., Yu H., Liu Z., Zhao C., Kong Q. Impending ionospheric anomaly preceding the Iquique $M_w 8.2$ earthquake in Chile on 2014 April 1 // Geophysical Journal International. 2015. Vol.103. No.3. P. 1461–1470.

9. *Kamiyama M., Sugito M., Kuse M.* Precursor of crustal movements before the 2011 Great East Japan Earthquake // Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake. Tokyo, Japan. 2012. P. 1–4.
10. *Liu X.L., Gao Y.J., Li M.* SeisGuard: A Software Platform to Establish Automatically an Earthquake Forecasting Model // Open Journal of Earthquake Research. 2023. Vol.12. P. 177–197.
11. *Martinelli G., Italiano F., Wang Y., Zheng G.* Gas geochemistry: New progresses and applications // Frontiers in Earth Science. 2022. Vol.10. Article 936733. P. 1–3.
12. *Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P.* Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes // Tectonophysics. 2007. Vol.431. No.1–4. P. 211–220.
13. *Ouzounov D., Pulinets S., Kafatos M., Taylor P.* Thermal Radiation Anomalies Associated with Major Earthquakes // Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies. John Wiley & Sons, Inc. 2018. P. 259–277.
14. *Pulinets S.A.* Seismic activity as a source of ionospheric variability // Advances in Space Research. 1998. Vol.22. No.6. P. 903–906.
15. *Pulinets S.A.* Physical Bases of the Short-Term Forecast of Earthquakes // Astronomical and Astrophysical Transactions. 2023. Vol.34. Issue 1. P. 65–84.
16. *Pulinets S.A., Ouzounov D.P., Davidenko D.V.* Is Earthquake Prediction Possible?! Integral Technologies of Multi-Parameter Monitoring of Geo-Effective Phenomena within the Framework of a Comprehensive Model of Interconnections in the Earth's Lithosphere, Atmosphere, and Ionosphere // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2015. Vol.51. No.4. P. 560–573.
17. *Ruiz F., Sánchez M.A., Martínez P., Giménez M.E., Leiva F., Álvarez O., Introcaso A.* La estación magnética Zonda: estudio de perturbaciones magnéticas relacionadas con terremotos // Latinmag Letters. 2011. Vol.1. Special Issue. Article A16. P. 1–7.
18. *Socquet A., Valdes J.P., Jara J., Cotton F., Walpersdorf A., Cotte N., Specht S., Ortega-Culaciati F., Carrizo D., Norabuena E.* An 8-month slow slip event triggers progressive nucleation of the 2014 Chile megathrust // Geophysical Research Letters. 2017. Vol.44. No.8. P. 4046–4053.
19. *Tramutoli V., Cuomo V., Filizzola C., Pergola N., Pietrapertosa C.* Assessing the potential of thermal infrared satellite surveys for monitoring seismically active areas // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol.96. No.3–4. P. 409–426.
20. *Zhang X., De Santis A., Liu J., Campuzano S.A., Yang N., Cianchini G., Ouyang X., D’Arcangelo S., Yang M., De Caro M.* Pre-earthquake oscillating and accelerating patterns in the Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere coupling (LAIC) before the 2022 Luding (China) Ms 6.8 earthquake // Remote Sensing. 2024. Vol.16. Article 2381. P. 1–36.

АЭРОТЕКТОНОФИЗИКА, ОПЫТ КАРТИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

Гордеев Н. А.¹

¹ – *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; gord@ifz.ru*

За последние годы происходит стремительное развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые стали незаменимым инструментом как в фундаментальной геологии, так и в промышленности [Perikleous, 2025]. Благодаря миниатюризации портативного оборудования, росту его производительности и простоте управления, дроны обеспечили беспрецедентные масштабность и точность в таких задачах, как реконструкция рельефа, картирование месторождений и мониторинг безопасности.

Особенно значимо применение БПЛА на промышленных объектах:

Мониторинг карьеров и открытых горных работ: Регулярная аэросъемка позволяет точно рассчитывать объемы добычи, контролировать устойчивость откосов и выявлять опасные зоны обрушения. Например, на угольных разрезах Кузбасса и нефтеносных песках Атабаски (Канада) БПЛА ежедневно отслеживают изменения контуров карьеров, что повышает безопасность и эффективность работ путём постоянного контролирования трещинообразования.

Инспекция инфраструктуры и надзор за строительством промышленных объектов. Дроны проводят обследование трубопроводов, линий электропередач и промышленных резервуаров. Тепловизионные камеры на БПЛА выявляют утечки в нефте- и газопроводах, а мультиспектральная съемка обнаруживает коррозию и повреждения на объектах нефтеперерабатывающих заводов без остановки производства, что значительно сокращает затраты и риски для персонала.

Комплексное применение беспилотных летательных аппаратов, оснащенных специализированными сенсорами, позволяет решать в археологии широкий спектр задач, начиная от обнаружения невидимых на поверхности объектов и заканчивая реконструкцией древней хозяйственной деятельности. Как демонстрируют исследования, тепловизионная съемка [Журбин, 2019] эффективно выявляет контуры погребенных построек по тепловым аномалиям, в то время как мультиспектральная съемка [Крупочкин, 2021] позволяет надежно отличать антропогенные структуры (например, курганы или древние пашни) от природных образований по характеристикам растительного покрова. В свою очередь, аэромагниторазведка [Валькова, 2023] успешно применяется для картирования археологических ландшафтов, связанных с металлургией, точно локализуя по магнитным аномалиям места расположения древних мастерских и горнов. В совокупности эти методы являются не инвазивными вариантами исследований и обеспечивают высокую сохранность объектов культурного наследия.

В работах Паршина А.В. и др. [2021; 2022] значительное внимание уделяется разработке и апробации комплексных геофизических методов. Его работы посвящены интеграции данных, полученных с помощью традиционной наземной и инновационной маловысотной аэромагниторазведки (в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов), с результатами других геофизических съемок, включая гравиразведку. Применение тепловизионной съемки также рассматривается в контексте расширения информативности комплексного подхода для решения конкретных геологических и археологических задач, например, при изучении объектов в Байкальском регионе. Ключевой аспект методологии Паршина А.В. заключается в разработке математико-картографического обеспечения и алгоритмов трехмерной инверсии, позволяющих проводить сравнительный анализ и интерпретацию разнородных геофизических данных для эффективного структурно-геологического картирования, поиска полезных ископаемых и мониторинга состояния природной среды. Это обеспечивает возможность формирования комплексных геоинформационных систем, где каждый из методов (магниторазведка, гравиразведка, тепловизионная съемка) дополняет друг друга, повышая достоверность и детальность итоговых моделей геологической среды.

Ключевую роль в построении геологических моделей разных регионов и месторождений играют технологии фотограмметрии – процесса, который позволяет по серии перекрывающихся снимков с БПЛА строить высокоточные трехмерные модели и ортофотопланы. Современные алгоритмы, такие как Structure from Motion (SfM) и Multi-View Stereo (MVS), позволяют автоматически выстраивать пространственные координаты точек местности, создавая детальные цифровые модели рельефа (ЦМР) и цифровые модели местности (ЦММ) [Bemis, 2014]. Благодаря этому можно быстро получать огромные объемы высококачественных данных для построения точных топографических и геологических моделей, что кардинально ускоряет процесс исследований.

Примеры исследований в структурной геологии на основе фотограмметрии:

Анализ разломных зон и тектонических напряжений: В исследовании Bemis et al. [2014] высокодетальные 3D-модели, построенные по данным БПЛА, были использованы для картирования разломных смещений и измерения ориентации тысяч трещин в зоне разломов. Это позволило количественно оценить поле тектонических напряжений, вызвавших землетрясение, с точностью, недостижимой при традиционной полевой съемке. Авторы описывают методику получения данных и их обработку для генерации облаков точек и ортофотопланов, подчеркивая преимущества подхода в документировании геологических структур и расширении возможностей анализа тектонических деформаций и палеосейсмических событий.

Методы дистанционного зондирования и фотограмметрии использовались для наблюдения за двумя сложными с точки зрения рельефа регионами в Западной Греции – рудник в известняках и оползень, произошедший в песчано-глинистых отложениях. Оба региона были нанесены на карту с помощью геодезических приборов, таких как тахеометры и GPS, а также вышеупомянутой системы беспилотных летательных аппаратов. Наконец, 3D-модели были сопоставлены с результатами полевых приборных измерений [Nikolakopoulos, 2016]. Удалось достигнуть сантиметровой точности по расчетам выработанных пространств и отслеживания смещений по бортам карьера.

В статье [Saeid, 2022] представлен обзор распространенных платформ и сенсорных систем для беспилотных летательных аппаратов, а также приведены современные методы дистанционного зондирования земли с помощью беспилотных летательных аппаратов и примеры их применения в нефтегазовой отрасли. Выделяются шесть обширных областей, включающих обнаружение разливов нефти на шельфе, обнаружение утечек нефти, мониторинг трубопроводов, обнаружение выбросов газа, дистанционный осмотр объектов, разведку нефти (т.е. землеустройство, геологическое картирование и разведку нефти) и мониторинг окружающей среды. Выделяются пробелы в исследованиях и нерешенные вопросы, а также возможности для дальнейшего развития в каждой из этих областей.

С помощью роторных БПЛА и фотограмметрии возможно проводить мониторинг оползневых склонов и зон развития трещиноватости. На основе серийных съемок и сравнения ЦМР разного времени были вычислены векторы смещений блоков породы и спрогнозирована дальнейшая эволюция склона, что критически важно для оценки природных рисков. В структурной геологии и тектонофизике детальные 3D-модели рельефа служат основополагающим материалом для анализа пространственного положения структурных элементов: разломов, складок, жил и трещин. Эта методология решает две ключевые задачи:

Выявление расположения и кинематики разломов, напряженного состояния пород и локальной геодинамики для прогнозирования рисков при разработке месторождений, т.е. определять структурно-геологические условия формирования пород массива.

Расширяет возможности безопасного сбора и анализа данных в рамках комбинированных аэро- и наземных работ для поиска ловушек полезных ископаемых, чья локализация напрямую связана с тектоническими структурами. Т.е. решается проблема обеспечения безопасности и эффективности труда геологов и геофизиков.

Таким образом, интеграция БПЛА и передовых технологий фотограмметрии открывает новые возможности для структурного анализа и промышленного применения, переводя их на качественно новый уровень точности, безопасности и экономической эффективности, что наглядно демонстрируют современные научные работы и успешные кейсы внедрения на промышленных объектах по всему миру.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФЗ РАН и лаборатории тектонофизики: FMWU-2025-0036 "Создание тектонофизической и геомеханической моделей коры и литосферы Крыма и Северного Причерноморья".

Литература

1 Валькова Е.Д., Паршин А.В., Костерев Н.А., Морозов В.А. Комплексирование методов дистанционного зондирования Земли для изучения археологических объектов в Приольхонье на (примере объекта Барун Халл II) // Инженерная и рудная геофизика 2023. Инженерная и рудная геология 2023. Морские технологии 2023. СПб, 2023 г.

2 Журбин И.В., Борисов А.В., Назмутдинова А.И., Милич В.Н., Петров Р.П., Иванова М.Г., Модин Р.Н., Князева Л.Ф., Воробьева Н.Г., Зинчук С.В. Комплексное использование методов дистанционного зондирования, геофизики и почвоведения при изучении археологических

памятников, разрушенных распашкой // Археология, этнография и антропология Евразии. Эпоха палеометалла. 2019. Т.47. №2. С. 103–111.

3 *Крупочкин Е.П., Папин Д.В.* Херексуры Юстыда: мультиспектральная съемка, опыт использования БПЛА для комплексного изучения // Теория и практика археологических исследований. 2021. Т.33. №4. С. 209–220.

4 *Снегирёв Н.В., Гаченко С.В., Паршин А.В.* Сравнительный анализ информативности маловысотной магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов и наземной магниторазведки // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т.46. №2. С. 182–189.

5 *Bemis S. P.* Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology [Электронный ресурс] // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2014. Vol.119. №2. P. 705–729.

6 *Nikolakopoulos K.* Unmanned aerial vehicles for geological applications // Bulletin of the Geological Society of Greece. 2016. Vol.50. 1662–1671.

7 *Parshin A., Gatilov M., Davidenko Y., Bashkeev A., Snegirev N., Milgunov A.* Using The “Triad” of Uav-Tem, Uav-Magnetic Prospecting and Uav-Gamma Spectrometry: Case of Prospecting for Blind Ore Deposits // EAGE. Conference & exhibition. Near surface geoscience. Conference Paper January 2022.

8 *Parshin A.; Bashkeev A.; Davidenko Y.; Persova M.; Iakovlev S.; Bukhalov S.; Grebenkin N.; Tokareva M.* Lightweight Unmanned Aerial System for Time-Domain Electromagnetic Prospecting — The Next Stage in Applied UAV Geophysics // Appl. Sci. 2021. Vol.11. 2060 p.

9 *Saeid A., Wilson J.O., Carlos R.S.F.* UAV-based remote sensing for the petroleum industry and environmental monitoring: State-of-the-art and perspectives // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol.208. Part D. 109633.

ПРИМЕНЕНИЕ SIMSGM ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В РАЙОНЕ CERBERUS FOSSAE НА МАРСЕ

Гордеев Н. А.¹, Батов А. В.¹, Гудкова Т. В.¹

¹ – *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; gord@ifz.ru*

Реконструкция тектонических напряжений на Марсе опирается на комплексный анализ морфологии поверхности, данные дистанционного зондирования и, в последние годы, на прямые сейсмологические измерения, полученные в ходе миссии НАСА InSight. Ученые используют эти данные для проверки геофизических моделей, описывающих эволюцию планеты [Jeffrey et al., 2007; Ivanov et al., 2008; Atkins et al., 2022; Fernando et al., 2023].

Общее поле напряжений сильно неоднородно. Общепринятая модель предполагает, что тектоническая эволюция Марса определялась двумя основными факторами: глобальным сжатием в результате остывания планеты и нагрузкой, создаваемой гигантской вулканической провинцией Фарсида (Tharsis) [Knappmeyer-Endrun et al., 2021; Madelyn Sita et al., 2022].

Поверхность Марса испещрена многочисленными уступами, грабенами и холмистыми «морщинистыми» грядами (thrust faults and wrinkle ridges), которые формировались, по-видимому, из-за глобального сжатия литосферы. Анализ этих структур позволяет оценить величину общей усадки планеты. Согласно исследованиям, глобальная контракционная деформация с Ноахийского периода (более 3 млрд лет назад) соответствует уменьшению радиуса планеты. Согласно ключевым исследованиям, таким как работа Nahm, Schultz [2011], общая величина уменьшения радиуса Марса, накопленная за всю его геологическую историю, составляет от 188 метров до 3,77 километра.

Колоссальная масса региона Фарсида вызывает изгиб литосферы, создавая сложное поле напряжений, определяемое растяжением литосферы вблизи центра и её сжатием на периферии. Моделирование показывает, что эти напряжения лучше всего объясняют существование обширных систем радиальных грабенов (рифтовых долин), окружающих регион [Jeffrey et al., 2008].

Новейшая тектоническая активность по данным обработки в SimSGM. Программное обеспечение SimSGM представляет собой специализированный инструмент для автоматизированной реконструкции неотектонических напряжений [Гордеев, Молчанов, 2019; Молчанов, Гордеев, 2021]. Оно использует структурно-геоморфологический метод Л.А. Сим (СГ-метод) [Сим, 1991] для анализа цифровых моделей рельефа или спутниковых снимков, автоматически выявляя и статистически обрабатывая линейные элементы рельефа, отражающие разломы и трещины. На основе ориентации этих структур программа рассчитывает и визуализирует главные оси сжатия и растяжения, позволяя геологам объективно определить поле напряжений в поверхностной части коры.

На Марсе в долине Цербера СГ-методом реконструировано 12 локальных стресс-состояния. Определено общее поле напряжений север-северо-восточного сжатия для серии разломов север-северо-западного простирания и смещающих их коротких субмеридиональных разлома. В основном все субширотные разломы имеют левосдвиговую кинематику.

Современная тектоническая активность по данным миссии InSight. Миссия InSight, работавшая с 2018 по 2022 год, зарегистрировала более 1300 марсотрясений (marsquakes), что позволило уточнить внутреннюю структуру планеты. Впервые удалось определить механизмы очагов части событий [Brinkman et al., 2021].

Большинство наиболее сильных низкочастотных марсотрясений (Low-Frequency, LF events) было локализовано в системе разломов Церберы, которая находится относительно близко к месту посадки InSight в равнине Элизий (Elysium Planitia) [Maguire et al., 2023].

Анализ сейсмических волн от этих событий показал преобладание механизмов, связанных с растяжением (нормальные сбросы), что указывает на активные экстенсивные тектонические процессы в этом регионе. Некоторые публикации предполагают, что эти события могут иметь вулканотектоническое происхождение, связанное с движением магмы в верхней мантии или нижней коре под равниной Элизий.

Самое крупное зарегистрированное событие на Марсе – марсотрясение S1222a магнитудой ~4.7. Хотя большинство событий в Цербере были экстенсивными, некоторые интерпретации механизма очага S1222a указывают на возможность компрессионного обратно-сбросового разлома, что является прямым подтверждением того, что глобальное сжатие по-прежнему является важным источником современных напряжений.

Геофизическое моделирование и структура коры. Сейсмические данные позволили создать первые прямые модели внутренней структуры Марса. Модели, объединяющие сейсмические ограничения с геодинамическими расчетами, предсказывают, что марсианская литосфера значительно толще земной и характеризуется низкой скоростью поперечных волн (S-волн) на глубине [Sun, Tkalčić, 2022; Nahm et al., 2011].

Поле напряжений в моделях: Современные геофизические модели, воспроизводящие распределение сейсмичности, в основном фокусируются на эффектах охлаждения и конвекции. Однако исследователи признают необходимость включения напряжений, связанных с топографическими нагрузками (например, гора Элизий), для полного понимания локального поля напряжений [Stahler et al., 2021].

Выводы. На основе реконструкции тектонических напряжений на Марсе можно сделать вывод, что планета функционировала в режиме «застойной крышки» (stagnant lid) и никогда не имела активной глобальной тектоники плит, подобной земной. Все наблюдаемые деформации марсианской коры контролировались в основном вертикальными процессами изостатической нагрузки вулканического нагорья Фарсида, которая генерировала доминирующее глобальное поле напряжений, а также общим термическим сжатием планеты по мере её остывания и утолщения литосферы. Именно эти следы напряжений и создали общий тренд север-северо-восточного сжатия на территории долины Цербера. Эти данные свидетельствуют о том, что Марс является геологически мертвым или крайне малоактивным телом, чья тектоническая история фундаментально отличается от земной и определяется режимом охлаждения единой жесткой оболочкой.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФЗ РАН.

Литература

- 1 Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. 2019. №2. С. 25–33.
- 2 Молчанов А.Б., Гордеев Н.А. Автоматизация метода реконструкции неотектонических напряжений Л.А. Сим с применением алгоритмов компьютерного зрения // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНИЦ РАН. 2021. Т.18. С. 301–304.
- 3 Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Изв. вузов. Геол. и разв. 1991. №10. С. 3–22.
- 4 Amir K. Upper mantle structure of Mars from InSight seismic data // Science. 2021. Vol.373. P. 434–438.
- 5 Atkins R.M., Byrne P.K., Bohnenstiehl D.R., Wegmann K.W. A Morphometric Investigation of Large-Scale Crustal Shortening on Mars // Journal of geophysical research. Planets. 2022. Vol.127. I.5.
- 6 Fernando B., Daubar I.J., Charalambous C., Grindrod P.M., Stott A., Ateqi A.A., Atri D., Ceylan S., Clinton J., Fillingim M., Hauber E., Hill J.R., Kawamura T., Liu J., Lucas A., et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight // Geophysical Research Letters Volume. 2023. Vol.50. I.20.
- 7 Knapmeyer-Endrun B. Thickness and structure of the Martian crust from InSight seismic data // Science. 2021. 373(6553):438–443.
- 8 Brinkman, N., Stähler, S. C., Giardini, D., Schmelzbach, C., Khan, A., Jacob, A., et al. First focal mechanisms of Marsquakes // Journal of Geophysical Research: Planets. 2021. Vol.126. e2020JE006546.
- 9 Ivanov M.A., J.W. Head III Formation and evolution of Lakshmi Planum, Venus: Assessment of models using observations from geological mapping // Planetary and Space Science. 2008. Vol.56. I.15. P. 1949–1966.
- 10 Andrews-Hanna J.C., Zuber M.T. Strike-slip faulting and the tectonic evolution of Mars // Lunar and Planetary Science XXXVIII. 2007. 1897.
- 11 Andrews-Hanna J.C., Zuber M.T., Hauck S.A. Head II Strike-slip faults on Mars: Observations and implications for global tectonics and geodynamics // Journal of geophysical research. 2008. Vol.3. I.E8.
- 12 Sita M., Lee S. Potential Volcano-Tectonic Origins and Faulting Mechanisms of Three Low-Frequency Marsquakes Detected by a Single InSight Seismometer // Journal of Geophysical Research: Planets. 2022. Vol.127. I.10. e2022JE007309.
- 13 Maguire R., Lekić V., Kim D., Schmerr N., Li J., Beghein C., et al. Focal mechanism determination of event S1222a and implications for tectonics near the dichotomy boundary in southern Elysium Planitia, Mars // Journal of Geophysical Research: Planets. 2023. Vol.128. e2023JE007793.
- 14 Nahm A., Schultz R. Magnitude of global contraction on Mars from analysis of surface faults: Implications for Martian thermal history Icarus. 2011.
- 15 Stahler S.C. Seismic detection of the Martian core // Science. 2021.
- 16 Sun W., Tkalčić H. Repetitive marsquakes in Martian upper mantle // Nat Commun. 2022. Vol.13. 1695.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВОВ ПОРОД ОСТРОВА ЮЖНАЯ ГЕОРГИЯ (АНТАРКТИКА)

Гордеев Н. А.¹, Кузнецов М. А.², Дунаев Н. Н.²

¹ – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; gord@ifz.ru

² – Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

Введение. Остров Южная Георгия геоморфологически представляет собой горное сооружение, состоящее из серии линейно-вытянутых хребтов и более изометричных поднятий. Его рельеф сформирован совокупным влиянием неотектонического поднятия и комплексной денудацией с ключевой ролью интенсивного оледенения (по разным представлениям от 56 до 75% площади острова). Максимальная высота острова – гора Пейджет, составляет 2934 м. В сниженных частях острова заметна ступенчатая последовательность плоских морских террас и стрендфлетов.

Геоморфологический анализ топокарт и космоснимков острова Южная Георгия в Антарктике был выполнен с целью изучения его особенностей и создания картографической модели разломной тектоники и тектонических напряжений. Создана схема разломов острова. Были определены наиболее характерные элементы геоморфологической структуры, которые являются основой для выявления особенностей и создания картографической модели разломной тектоники и тектонических напряжений.

Материалы и методы. Была проведена геоморфологическая интерпретация различных топографических и геологических карт, а также дешифрирование различных космических снимков среднего, высокого и сверхвысокого разрешения из ресурсов Google Earth и Bing.

Тектонические разрывы и трещины были выделены путем изучения линеаментов рельефа с использованием определенной методики [Применение геом. метод..., 1970; Костенко и др., 1999; Брянцева и др., 2012]. В рельефе острова Южная Георгия эти разрывы связаны с изменением гребней поднятий, расширением или сужением отдельных элементов рельефа, коленообразными формами изогипс и их сгущением на значительном протяжении, направлением трещин отседания и линейным водотоков. Системность линеаментов также говорит о их разломно-тектонической природе. На рис. 1 представлены основные разломы.



Рис. 1. Схема тектонических нарушений острова Южная Георгия

В работе использован структурно-геоморфологический метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим в его новой модификации в программном обеспечении SimSGM от группы авторов Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. [2019; 2021]. Суть метода заключается в автоматическом дешифрировании линеаментов с помощью методов компьютерного зрения и дальнейшей классификации

структур рельефа по «палетке М.В.Гзовского». Дешифрованные линеаменты подразделяются на системы сопряженных R и R' сколов и отрывы. Их взаимное положение в плане указывает на направление перемещения блоков вдоль разлома и простираание максимальных напряжений растяжения и сжатия.

Результаты. Основной характеристикой рельефа острова является его дугообразная форма в плане, изрезанность его побережья фьордами, альпийский тип рельефа суши, поперечная зональность горного сооружения, выражающаяся в рисунках и абсолютных отметках рельефа.

На основании построенной схемы тектонических нарушений территорию острова геоморфологически можно разделить на четыре области – северную, северо-восточную, центральную и южную. Это деление основано на двух ключевых признаках: 1) смене ориентации хребтов и разломов с субширотной на северо-восточную и северо-западную и 2) повышению абсолютных высот рельефа в направлении с северо-запада на юго-восток. Границы между сегментами проведены по протяженным северо-восточным разломам, которые, согласно геолого-геофизическим данным [Graham et al; 2008], пересекают весь остров и продолжаются в акваторию.

Северная область является самой низкой частью острова. Северная область с юга ограничена крупным разломом, проходящим севернее бухты Йоссак. Этот разлом тянется через самое узкое место острова, меняет направление и уходит в акваторию. Внутри области преобладают два направления крупных тектонических зон: широтное и северо-восточное. Широтные зоны определяют расположение высоких горных поднятий (до 1145 м), что в целом согласуется с вытянутой формой самого острова.

Южнее расположена Северо-восточная область, для которой характерны более высокие отметки рельефа (до 1337 м). Ее поднятия разделены тектоническими нарушениями северо-восточного и северо-западного направлений, среди которых преобладают северо-восточные. С юга область ограничена разломом, проходящим через бухту Ньюарк и пересекающим весь остров.

Центральная область отличается самыми высокими абсолютными отметками региона – альпинотипным хребтом Аллардайс (до 2934 м). Хребет имеет асимметричное строение: его юго-западный склон крутой и короткий, а северо-восточный – более пологий и длинный. Дугообразная форма разломов указывает на их формирование в условиях надвигов и взбросов. Южная граница области проходит по разлому, пересекающему остров от бухты Андин-Саут до бухты Ройал.

Для Южной области характерна повышенная тектоническая сложность. Ключевым структурным элементом является разлом, который рассекает хребет Салвесен (до 2331 м) на две ветви и прослеживается в акваторию. Взаимодействие систем разломов северо-западного и северо-восточного простираания, часто изогнутых, приводит к формированию здесь сложной блоковой структуры.

С целью реконструкции новых данных о тектонических напряжениях использовались выявленные линеаменты, которые были идентифицированы как тектонические трещины и разломы. Была выполнена реконструкция напряжений с помощью ПО SimSGM. Установлено, что на новейший тектонический этап для Южной Георгии свойственны напряжения сжатия северо-восточного и субширотного простирааний (рис. 2). Это связано с уникальной геодинамикой всего острова, он расположен на продолжении крупного левосдвигового трансформного разлома Хребет Северный Скоша [Тетерин и др., 2015].

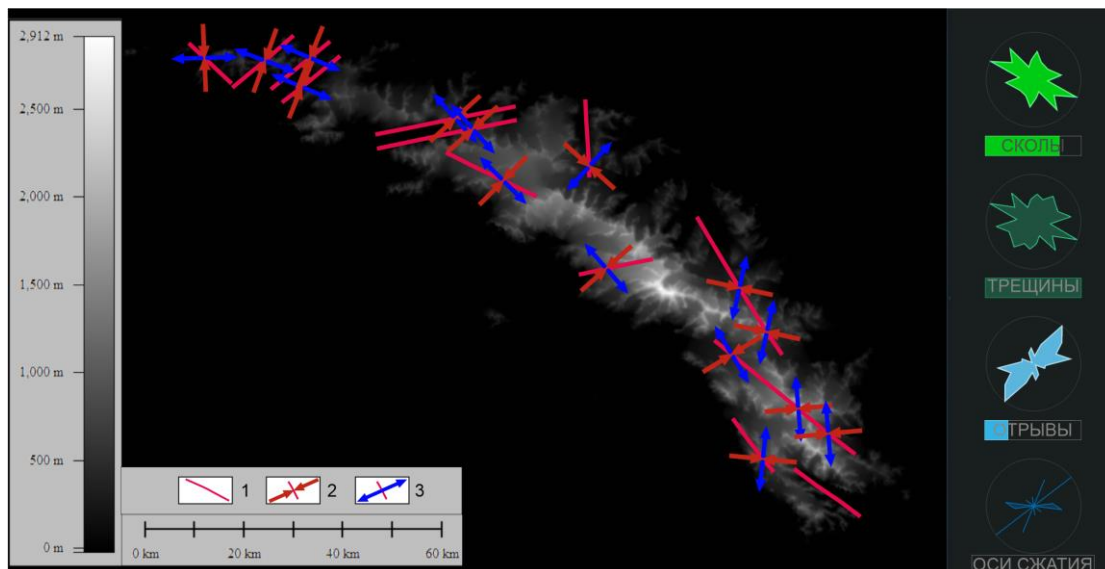


Рис. 2. Карта новейших тектонических напряжений острова Южная Георгия. 1 – разломы; 2 – оси максимального сжатия; 3 – оси максимального растяжения. Справа в столбец розы-диаграммы: ярко-зеленая – дешифрованные сколовые нарушения; зеленая – все дешифрованные мегатрещины; голубая – дешифрованные отрывные нарушения; синяя – простирания осей сжатия

Вывод о формировании основных структур в условиях интенсивного сжатия с СВ подтверждается исследованиями механизмов очагов землетрясений [Rebetskiy, 2020], в данной работе для Южной Георгии получена информация о геодинамическом типе напряженного состояния горизонтального сжатия в северо-восточном направлении.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФЗ РАН и лаборатории тектонофизики: FMWU-2025-0036 "Создание тектонофизической и геомеханической моделей коры и литосферы Крыма и Северного Причерноморья".

Литература

- 1 Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. 2019. №2. С. 25–33.
- 2 Молчанов А.Б., Гордеев Н.А. Автоматизация метода реконструкции неотектонических напряжений Л.А. Сим с применением алгоритмов компьютерного зрения // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. Т.18. С. 301–304.
- 3 Тетерин Д.Е., Дубинин Е.П., Удинцев Г.Б., Кольцова А.В., Домарацкая Л.Г. Основные тектонические элементы плиты Скоша // Океанология. 2015. Т.55. №2. С. 262–271.
- 4 Graham A.G.C., Fretwell P.T., Larter R.D., Hodgson D.A., Wilson C.K., Tate A.J., Morris P. A new bathymetric compilation highlighting extensive paleo-ice sheet drainage on the continental shelf, South Georgia, sub-Antarctica // Geochemistry Geophysics Geosystems Electronic journal of the earth sciences. 2008. Vol.9. N.7. P. 1–21.
- 5 Rebetskiy, Y.L. Pattern of Global Crustal Stresses of the Earth // Geotecton. 2020. Vol.54. P. 723–740.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВИЗАЦИИ РАЗЛОМА ВБЛИЗИ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА РУДНИКА

Докучаева А. И.¹, Трофимов В. А.¹, Филиппов Ю. А.¹, Макеева Т. Г.²

¹ – *Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Россия; ana-anastasia2015@yandex.ru*

² – *Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия*

Проблема техногенной активизации тектонических нарушений в районах интенсивной добычи полезных ископаемых является одной из наиболее актуальных в горном деле. Образование обширных подработанных полостей приводит к кардинальной перестройке естественного поля напряжений, в результате чего ранее стабильные разломы могут прийти в движение [Одинцев и др., 2024]. Это проявляется в виде значительных подвижек земной поверхности, формирования трещин и провалов, что, в свою очередь, создает угрозу для объектов инфраструктуры [Филиппов и др., 2023], приводит к экологическому ущербу и представляет социальную опасность, особенно в густонаселенных регионах с длительной историей добычи (Донбасс, Кузбасс). Существующие методы борьбы с последствиями, такие как: закладка, мониторинг и ограничение строительства, часто запаздывают и направлены на устранение уже случившегося. Возрастает важность методов прогнозного численного моделирования, которые позволяют количественно оценить риски и заранее определить зоны потенциальной опасности [Макеева и др., 2023]. Целью данной работы является оценка влияния формирования выработанного пространства на активизацию близлежащего разлома при различных значениях исходного поля тектонических напряжений в массиве.

Численные исследования проводились в программном комплексе ANSYS Workbench, в нем была разработана трехмерная конечно-элементная модель массива горных пород, содержащая начальный разлом протяженностью 500 м и «выработанное» пространство размером 100×100 м, расположенное на некотором расстоянии от разлома. Отметим, что разлом может иметь любую протяженность, но в принятой к расчетам модели именно участок в 500 м обладает ослабленными прочностными характеристиками, т.е. попросту разрушен и в нем исходные напряжения отсутствуют. Существовавшие до его разрушения в прошлом напряжения переместились на краевые части разлома и сформировали существующее исходное состояние массива.

При отработке месторождения практически всегда в массиве горных пород формируется некоторая обширная область, в пределах которой располагаются различного рода выработки, очистные пространства, зоны нарушенного и разрушенного материала. Ввиду их компактного расположения геометрически они могут быть объединены в некоторую область – «выработанное» пространство, очерченное соответствующим контуром.

При моделировании можно полагать, что эта область заполнена однородным материалом с пониженными деформационными и прочностными свойствами. При этом дополнительные напряжения, действующие к ее границам, составляют некую долю от исходных напряжений в массиве, варьирующуюся от 0 до 1. Очевидно, что рассмотрение параметров напряженно-деформированного состояния внутри этой области и в некоторой окрестности не имеет смысла. Тем не менее, дальнейшее влияние «выработанного» пространств может быть оценено.

Модель материала предполагала упругое поведение до достижения предела прочности, за которым следовало хрупкое разрушение. Используемые параметры: модуль Юнга (E) = 30 ГПа, Коэффициент Пуассона (ν) = 0.18, Модуль сдвига (G) = 12.7 ГПа. Для моделирования развития разлома, обусловленного формированием «выработанного» пространства, был применен алгоритм SMART Crack Growth, использующий энергетические критерии разрушения и адаптивное перестроение сетки.

По мере развития «выработанного» пространства разлом испытывает его влияние и при определенных условиях может увеличивать свою протяженность. Для этого вычисляются параметры напряженно-деформированного состояния массива вблизи кончиков разлома и оценивается выполнение того или иного прочностного критерия по линии разлома. В приведенных результатах не отражается процесс прорастания разлома, данные приведены только на момент остановки прорастания для выбранной конфигурации «выработанного» пространства.

Граничные условия модели задавались как ограничения нормальных перемещений на боковых и нижней гранях расчетной области, т.е. они полагались равными нулю. Верхняя грань расчетной области остается свободной, т.е. соответствует земной поверхности (рис. 1). Сгенерированная алгоритмом SMART начальная конечноэлементная сетка приведена на рис. 2.

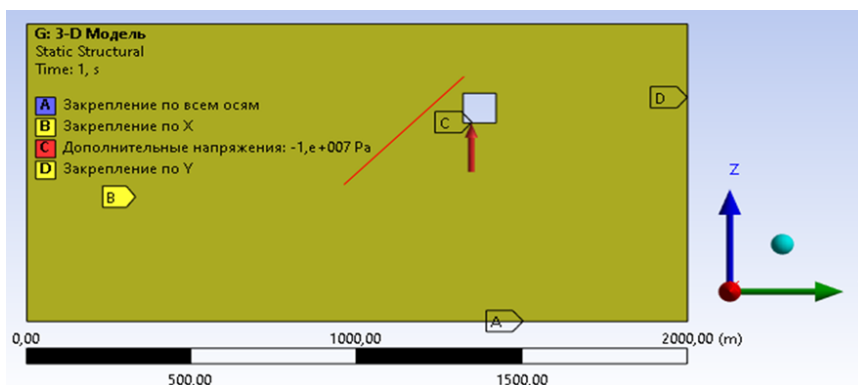


Рис. 1. Граничные условия

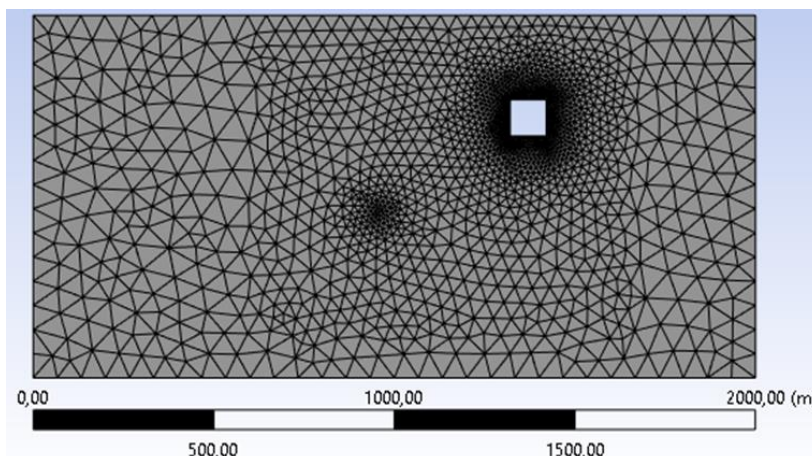


Рис. 2. Начальная конечно-элементная расчетная сетка

В качестве нагружающего воздействия к границам «выработанного» пространства прикладывались постоянные нормальные растягивающие напряжения, составляющие часть исходных напряжений в массиве в соответствии со сказанным ранее. При этом вертикальные исходные напряжения полагались линейно нарастающими с глубиной в соответствии с принятой плотностью пород. Что касается горизонтальных напряжений (тектонических), то при расчетах они варьировались. Далее приводятся полученные результаты для значения этих напряжений в 10 МПа.

Проведенная серия расчетов в нелинейной постановке позволила получить количественные оценки деформационных процессов для каждого сценария. Результаты показали прямую зависимость величины смещений от величины и знака приложенного тектонического напряжения. При исходных напряжениях в 10 МПа максимальное развитие деформаций – смещение по разлому достигает ~65 мм (рис. 3).

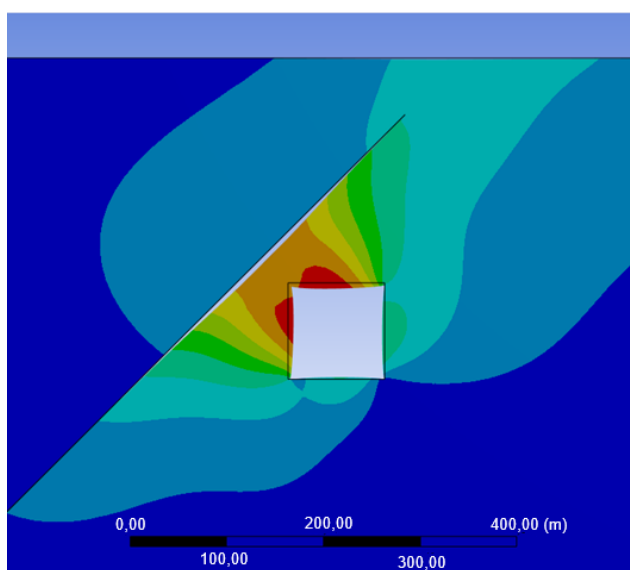


Рис. 3. Поля смещений для исходных напряжений в 10 МПа

Визуализация эквивалентных напряжений (по Мизесу) выявила четкую локализацию зон повышенной концентрации вблизи краев выработанного пространства и вдоль поверхности смещения разлома. При этом формируется сплошная зона высоких напряжений, соединяющая выработку и разлом, что указывает на высокий риск хрупкого разрушения и возможной резкой активизации разлома (рис. 4).

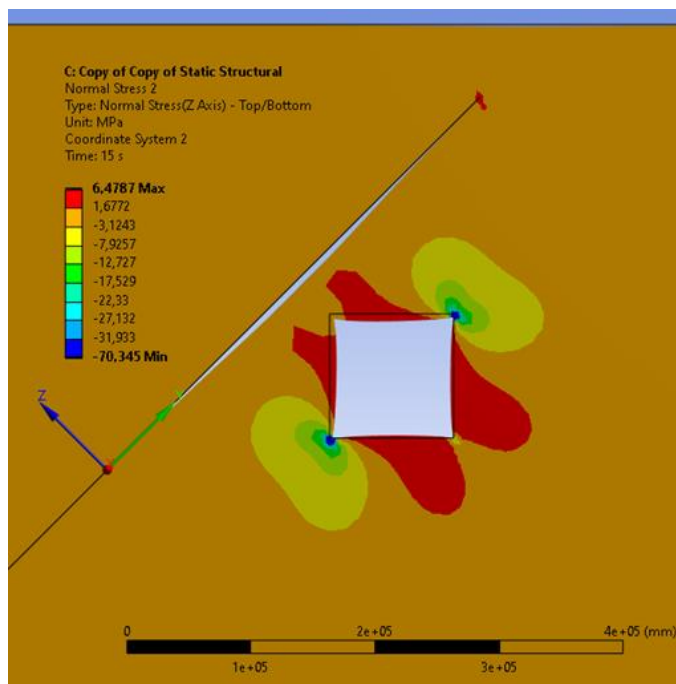


Рис. 4. Эквивалентные напряжения (по Мизесу) для исходных напряжений в 10 МПа

Полученные данные позволяют определить зоны активных подвижек: наиболее опасными являются участки разлома в непосредственной близости от выработанного пространства, особенно в условиях регионального тектонического сжатия (надвига). Именно здесь фокусируются пластические деформации и происходит рост трещины.

Методом конечных элементов в ANSYS показано, что формирование выработанного пространства вблизи тектонического разлома оказывает существенное влияние на его техногенную активизацию. При горизонтальном сжатии 10 МПа прогнозируемые смещения по разлому могут достигать 65 мм, а зоны высокой концентрации напряжений объединяют выработку и нарушение, создавая риск критической деформации вмещающих пород.

Практическая значимость работы заключается в возможности количественного прогноза деформаций и определения зон повышенного риска для объектов инфраструктуры на основе данных о региональном напряженном состоянии массива. Это позволяет заранее планировать разработку, чтобы избежать опасных ситуаций, а не просто наблюдать за ними.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на уточнение модели за счет учета неоднородности массива, ползучести горных пород и проведения валидации результатов моделирования данными натурных геодезических наблюдений.

Литература

1. *Макеева Т.Г.* Аппроксимация 2D-мульды оседания земной поверхности по экспериментальным точкам // 2023. №3. С. 107–123.
2. *Одинцев В.Н.* О прочности массивов горных пород вблизи выработок на больших глубинах // Актуальные вопросы прочности. Сборник тезисов LXVII Международной конференции. Екатеринбург. 2024. С. 319–320.
3. *Филиппов Ю.А.* Методика математического моделирования устойчивости горнотехнических сооружений // Геоэкологические проблемы техногенного этапа истории земли. 2023. С. 134–136.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РЕГИОНЕ ЗАИЛИЙСКОГО АЛАТАУ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЗА 2000–2024 ГГ.

Досайбекова С. К.¹, Досымбекова Ж. Б.¹, Жунусова Ж. К.¹, Амиров Н. Б.¹

¹ – ТОО «Национальный научный центр сейсмологических наблюдений и исследований», г. Алматы, Казахстан; sdk_0102@mail.ru

В предгорьях Заилийского Алатау трижды имели место разрушительные землетрясения – Верненское 1887 г. с магнитудой 7.3, Чиликское 1889 г. с магнитудой 8.3, и Кеминским 1911 г. с магнитудой 8.2. Достаточно сильные землетрясения на территории Северного Тянь-Шаня произошли также в 20 веке, такие как Жаланаш-Тюпское землетрясение 1978 г. с магнитудой 6.9 и Суусамырское землетрясение 1992 года с магнитудой 7.3 [Нурмагамбетов, 1999].

Такого рода события обычно связывают с сейсмогенерирующими зонами Северного Тянь-Шаня. Главными из этих зон на территории Заилийского Алатау являются – Алма-Атинская, Заилийская и Чилико-Кеминская. Их сейсмopotенциал достаточно велик – возможные магнитуды сильнейших землетрясений с очагами в этих зонах составляют соответственно от 7.5 до 8.5, а интенсивность сотрясений для этой территории может достигать от 8 до 10 баллов. Как показано в тех работах, простираение сейсмоактивных зон совпадает с простираением хребтов Заилийский и Кунгей Алатау и простираением Чилико-Кеминской зоны разломов [Полешко и др., 2016].

Изучение механизмов очагов землетрясений, которые являются источниками сейсмических волн, играет значительную роль в исследовании тектонических движений земной коры, где происходят землетрясения. Анализ локальных деформаций в очагах землетрясений в данной сейсмоактивной области помогает понять текущее напряжённо-деформированное состояние этой области. Эти данные могут быть использованы для оценки условий формирования тектонических структур, определения сейсмической опасности и прогнозирования сильных землетрясений. Основная цель статьи заключается в проведении анализа различных типов движений в очагах землетрясений, зарегистрированных за последние более двадцати лет (2000-2024 гг.), а также в создании модели современного поля напряжений в земной коре, способствующего возникновению сильных землетрясений.

Определение фокальных механизмов в Казахстане производится на основе моделирования очага в рамках теории дислокаций по данным о направлениях смещений (знаках) в первых вступлениях объёмных волн по стандартной методике А.В. Введенской [Введенская А.В., 1956]. По сейсмическим данным устанавливаются два равновероятных положения плоскости разрыва, направление подвижки и ориентация в пространстве главных осей напряжений. Реальная точность определения параметров составляет $\pm 20^{\circ}$. Достоверность определения параметров очагов землетрясений в используемой методике зависит от плотности расположения сейсмических станций. От надёжности определения знаков первых вступлений волн на записях землетрясений станциями Республиканской сейсмической сети, а также от числа регистрирующих станций и окружения ими эпицентров, зависит точность определения параметров индивидуальных механизмов [Досайбекова и др., 2023].

Для достижения этой цели проанализировали сейсмологические данные, собранные за выбранный период, который является одним из наиболее сейсмически активных. В зоне Заилийского Алатау за это время произошло 5 землетрясений с энергетическим классом $K = 13$. Были отобраны данные из каталога механизмов очагов землетрясений с $K \geq 9.6$ и, основываясь на полученных данных, составлена карта механизмов очагов землетрясений за указанный период.

Для определения механизма очага землетрясения была использована дислокационная модель, разработанная Введенской [Введенская, 1969]. Практическая реализация этой процедуры основана на анализе знаков первых вступлений продольных волн, зарегистрированных региональной сетью сейсмических станций на данной территории. Исследуемая территория ограничивается координатами: $42^{\circ}00'$ – $44^{\circ}00'$ северной широты и $74^{\circ}00'$ – $78^{\circ}30'$ восточной долготы. Все выборки данных проводились по указанным координатам из каталога механизмов очагов землетрясений Казахстана, который был создан на основе знаков первых вступлений продольных волн, зарегистрированных широкополосными цифровыми станциями ТОО «ННЦСНИ» [Досымбекова и др., 2022]. В таблице 1 приведена информация о количестве произошедших землетрясений (N) на изучаемой территории и тех землетрясений, для которых определены механизмы очагов (n).

Таблица 1. Количество определений механизмов очагов землетрясений за 2000-2024 гг., произошедших на территории Заилийского Алатау. (К – энергетический класс, N – общее количество землетрясений, n – число землетрясений, для которых определены механизмы очагов)

К	9	10	11	12	13	Сумма
N	71	90	31	9	5	206
n	54	90	31	8	5	188
n\N	73%	100%	100%	89%	100%	

На рис. 1а представлено распределение эпицентров и диаграммы фокальных механизмов для 188 землетрясений с энергетическими классами 9.6 и более за период с 2000 г. по 2024 г. Гипоцентры этих землетрясений находятся на глубине 5-25 км, т.е. они расположены в верхней части земной коры.

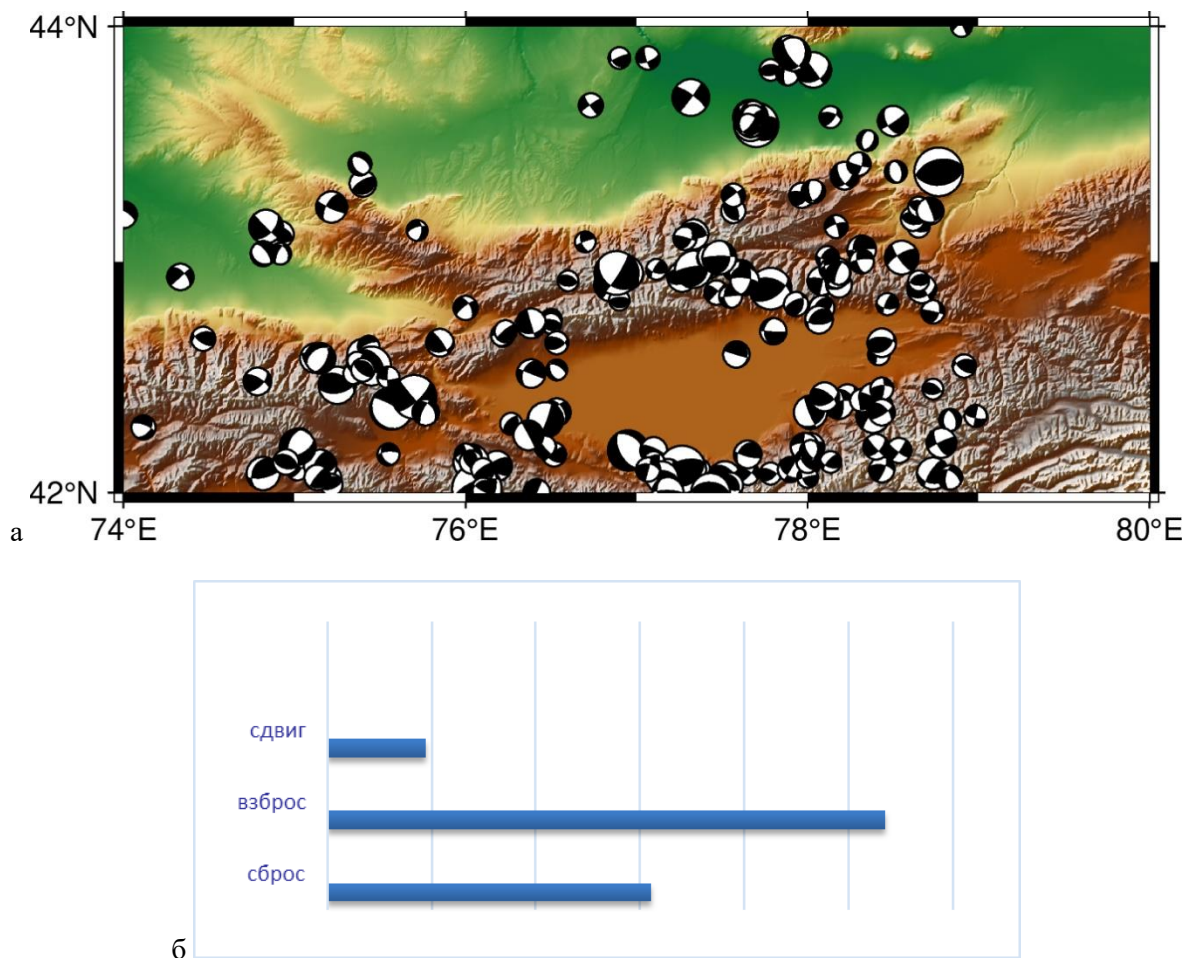
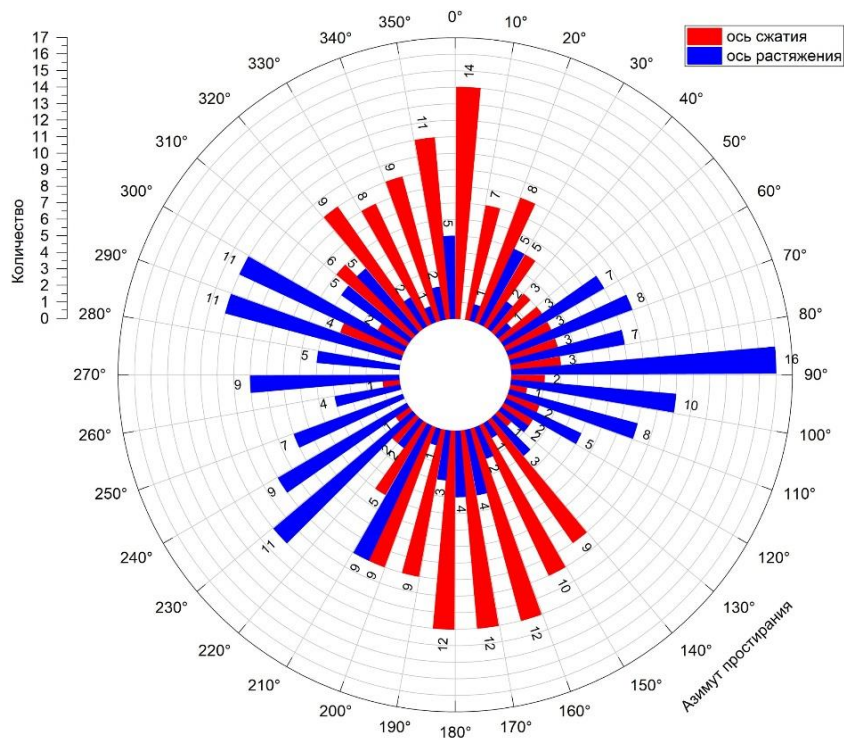


Рис. 1. (а) – Карта механизмов очагов землетрясений Заилийского Алатау за 2000-2024 гг. с классом $K \geq 9.6$ и выше; (б) – Численное распределение типов подвижек в очагах

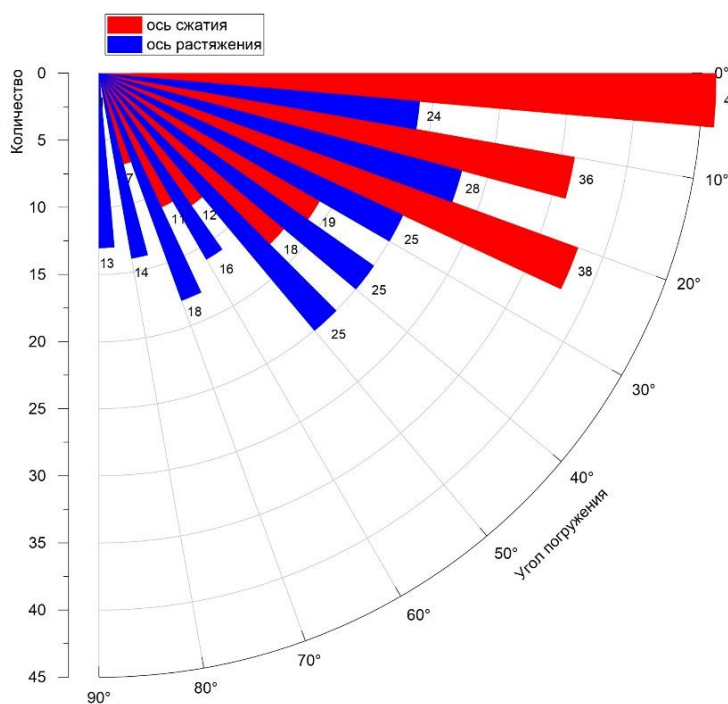
Из гистограммы (рис. 1б), максимальное количество подвижек относится к взбросовому типу. Максимальный энергетический класс землетрясений в указанный период в данном регионе достиг 13.0.

Таким образом, результаты исследования механизмов очагов землетрясений на территории Заилийского Алатау за 2000-2024 гг. показали, что в целом на территории преобладает взбросовый тип механизма, в очаге, что говорит о преобладании в регионе условий субгоризонтального сжатия земной коры за счет коллизии Индийской и Евразийской литосферных плит.

В последнее время, одним из сильных землетрясений в данном регионе является событие 4 марта 2024 года в 06:22 по UTC. Эпицентр этого события находился в 31 км от г. Алматы на границе Казахстана и Киргизии. Интенсивность сотрясений в г. Алматы составила 5 баллов.



а



б

Рис. 2. (а) – Векторные диаграммы распределения азимутов осей напряжения сжатия (красный) и растяжения (синий); (б) – Векторные диаграммы распределение углов погружения осей сжатия (красный) и растяжения (синий)

Таблица 2. Параметры механизма очага землетрясения (04.03.2024 г., 06:22 UTC)

№	Дата	t ₀ , ч мин с	координаты				h, км	К	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
			широта		долгота				P		T		N		NP1			NP2		
	AZM	PL	AZM	PL	AZM	PL	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP								
1	04.03.2024	06:22:51	42°	57'	76°	53'	20	13.0	157	41	273	27	26	37	132	39	-167	32	82	-51

Фокальный механизм очага землетрясения с $K = 13.0$ определены с использованием 22 знаков первых движений Р-волн, записанных сейсмическими сетями ТОО «ННЦСНИ». Получено надежное решение механизма очага, в котором согласованность знаков составляет 100% (таблица 2). Механизм очага характеризуется сбросо-сдвигом [Masaki, 2002].

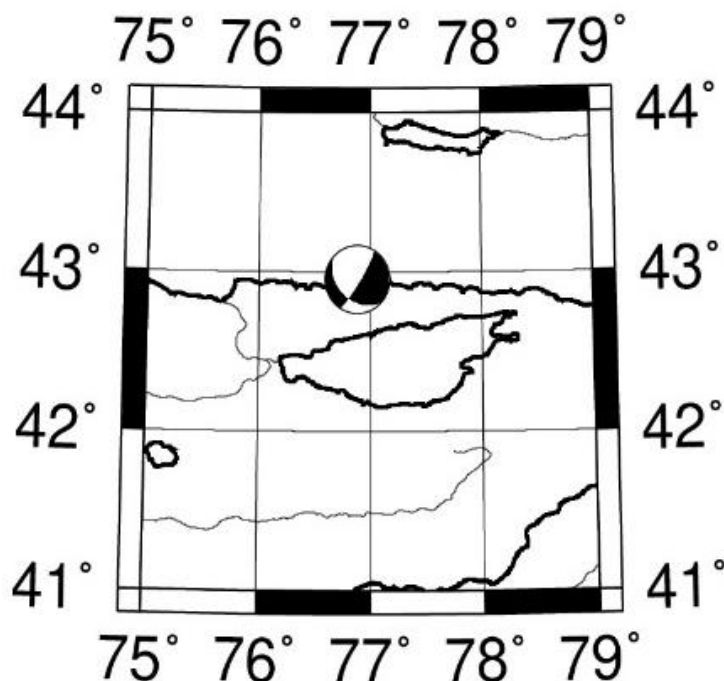


Рис. 5. Стереограмма механизм очага землетрясения (04.03.2024 г., 06:22 по UTC)

Представляет интерес тот факт, что это событие произошло в том же районе, где был очаг разрушительного Кеминского землетрясения в 1911 г. и может означать, что тот очаг начал активизироваться. Более глубокий анализ этого землетрясения будет приведен в нашей следующей работе.

Работа выполнена по программе BR24992763 финансируемой комитетом науки Министерства науки и высшего образования Казахстана.

Литература

1. Введенская А.В. Определение полей смещений при землетрясениях с помощью теории дислокаций // Изв. Ан СССР. Сер.геофиз. 1956. №3. С.277–284.
2. Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука. 1969. С. 47–66.
3. Досайбекова С.К., Далбаева Ж.А., Досымбекова Ж.Б., Жунусова Ж.К. «Анализ результатов наблюдений постоянной сетью сейсмического мониторинга на территории Казахстана». XI Казахстанско-Китайский международный симпозиум «Прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности и сейсмического риска в Центральной Азии» 26-28 сентября 2023 год. г. Алматы. 150 с.
4. Досымбекова Ж.Б., Досайбекова С.К., Жунусова Ж.К. Жылғы жерсілкінісі ошақтары механизмдерінің деректері бойынша Солтүстік Тянь-Шаньмен Жоңғар тауларының сейсмотектоникалық жағдайы. Международной научной конференции «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», г. Алматы. 2022. 249 с.
5. Masaki N. Determination of focal mechanism solution using initial motion polarity of P and S waves // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2002. 130. P. 17–29.
6. Нурмагамбетов А.Н. Сейсмическая история Алматы. Алматы: LEM, 68 с. 1999.
7. Полешко Н.Н., Досайбекова С.К. Сейсмотектоническая обстановка по данным механизмов очагов землетрясений Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона Казахстана // Вестник АО «КазНИИСА». 2016. С. 25–34.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО НАГРЕВУ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Индаков Г. С.^{1,2}, Казначеев П. А.², Майбук З.-Ю. Я.², Пономарев А. В.², Матвеев М. А.², Морозов Ю. А.², Подымова Н. Б.^{1,2}

¹ – Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; indakov.gs16@physics.msu.ru

² – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Введение. В отношении анализа данных по термическому воздействию на породы одной из ключевых малоразработанных проблем, связанных с акустической эмиссией (АЭ), является анализ взаимосвязей между физически различными статистическими параметрами микроструктуры породы и параметрами процессов, происходящих при термическом воздействии на породу. Данная работа направлена на получение новых знаний о физических свойствах природных материалов – горных пород, о взаимосвязях микроструктуры пород и характера разрушения при воздействии высоких температур. Исследованы вопросы устойчивости оценки микроструктурных параметров пород методами оптической спектроскопии, представительности статистических параметров термически стимулированной АЭ (ТАЭ) для описания процесса разрушения и корреляции между указанными величинами.

Материалы и методы. Для анализа были отобраны образцы песчаников и метапесчаников. Метапесчаники являются метатерригенными горными породами Северного Приладожья (Карелия, Россия). Образцы представляют собой цилиндрические керны из флишоидной серии пород со средней плотностью 2.77 ± 0.07 г/см³, взятые в пяти разных зонах отбора в районе озера Янисъярви. Предполагается, что для зон отбора имели место различные условия метаморфизма пород: исходные осадочные породы схожего состава и происхождения (кварц-полевошпат-слюдистые породы) претерпели разные тектоно-термальные преобразования на различных глубинах и температурах. Оценки температуры метаморфизма, разделяемого изоградами минералов (граната, ставролита, гиперстена, силлиманит-мусковитовой и силлиманит-ортоклазовой ассоциациями), варьируются в диапазоне от 350 °С до 750 °С, а давления – от 1.5 до 7 кбар (таблица 1) [Подымова и др., 2024].

Таблица 1. Сводная информация о зонах отбора образцов метапесчаников

Номер зоны отбора	Количество образцов	Параметры метаморфизма (по [Великославинский, 1971])	
		Значения давления, кбар	Значения температуры, °С
1	3	1.5 – 4	400 – 500
2	6	2 – 5	450 – 600
3	1	2.5 – 6	500 – 650
4	2	3 – 6.5	600 – 750
5	2	3 – 7	650 – 800
6	1	–	–

Также исследовались два образца мелкозернистого песчаника, один из которых (основной) предварительно подвергался одноосному нагружению до нагрузки, близкой к разрушающей, с видимыми проявлениями трещин на поверхности [Индаков и др., 2025].

Эксперименты по нагреву образцов проводились на установке, описанной в [Казначеев и др., 2019-а] и [Казначеев и др., 2019-б], которая позволяла осуществлять нагрев с заданной скоростью и регистрировать импульсы термически стимулированной АЭ (ТАЭ). Первичная обработка зарегистрированных импульсов АЭ включала идентификацию и удаление помеховых импульсов, которые идентифицировались по сравнительному анализу сигналов с основного датчика АЭ и датчика контроля помех, оценку стабильности характеристик за время эксперимента, измерение параметров импульсов АЭ, и производилась в программах A-Line 32D компании Интерюнис [Елизаров, 2008] и AE Workbench Correlation Expert разработки Комарова А.Г. [Комаров, 2018].

Параметры развития разрушения. Анализировались параметры активности, наклона графика повторяемости (*b*-value), а также параметры волновых форм импульсов. Активность потока акустической эмиссии определялась как количество событий АЭ в единицу времени. Оценка *b*-value производилась методом максимального правдоподобия для цензурированной выборки [Потанина и др., 2011]. Активность и *b*-value оценивались в непересекающихся окнах в 200 событий для получения репрезентативных значений. Помимо них рассматривались параметры RA и AF, где RA («Rise Angle») – «угол нарастания», отношение длительности нарастания сигнала к его максимальной амплитуде («Rise Time To Amplitude»), а AF («Average Frequency») – «средняя частота», отношение общей длительности сигнала к числу пересечений порога. RA можно интерпретировать как величину, обратно пропорциональную скорости нарастания огибающей сигнала АЭ [Liu et al., 2019]. Так, сдвиговые трещины характеризуются в целом более низкочастотным сигналом (низкая средняя частота AF) и длительным временем нарастания (большое значение RA), в то время как трещины растяжения, напротив, характеризуются высокими средними частотами AF и малыми RA.

Микроструктура. В работах, посвященных лабораторному анализу горных пород, часто приводятся данные о средних характерных размерах зерен исследуемых образцов, но обычно не приводится их распределение по размерам. В данной работе проведен анализ микроструктуры образцов метапесчаников на основе оптических снимков с расчетом параметров распределения зерен минералов по размерам (рис. 1) – прежде всего, медианны d_{median} , связанной со средним объемным диаметром зерен D линейным соотношением (1) [Papadakis, 1964] в предположении об их сферичности:

$$D = 1.45 \cdot d_{median} \quad (1)$$

Валидация полученных результатов проведена методом широкополосной акустической спектроскопии [Подымова и др., 2024].

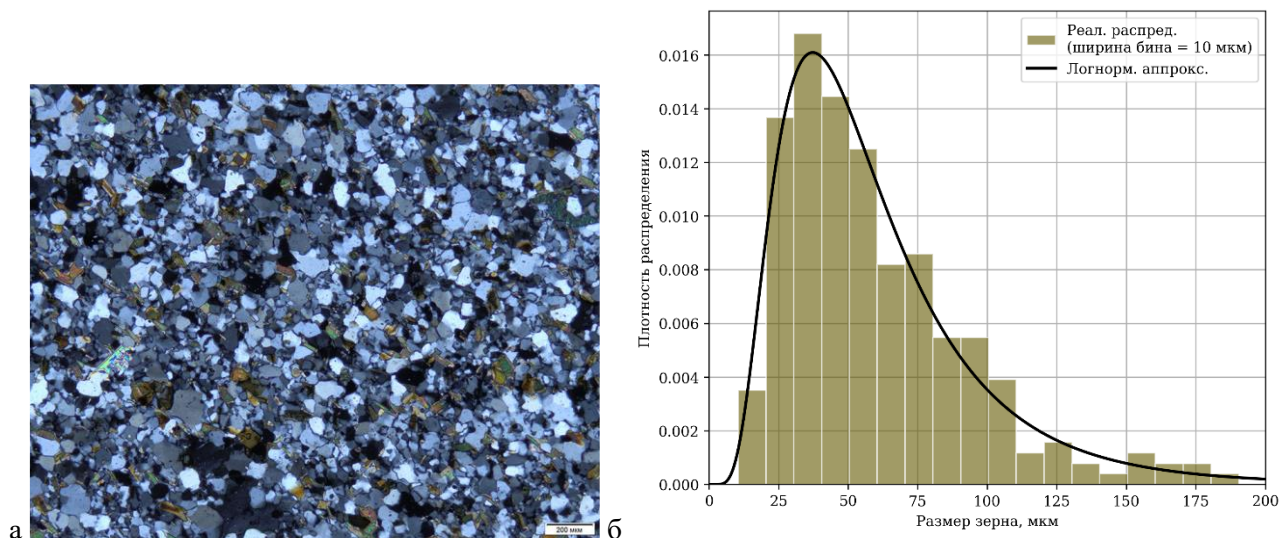


Рис. 1. Оценка размеров зёрен методом пересечения опорных линий по данным оптической микроскопии для образца метапесчаника ЛВ1356: (а) – микрофотография масштаба 200 мкм, (б) – соответствующее ей распределение зёрен по размерам

Машинное обучение. В рамках задачи анализа зарегистрированных волновых форм активно развиваются методы выделения групп (кластеров) волновых форм и соответствующих им источников. Наиболее эффективным методом идентификации схожих сигналов во временных рядах является кросскорреляционный анализ. При этом оценивается взаимная корреляционная функция волновой формы идентифицируемого сигнала с волновой формой заданного сигнала (шаблоном), степень сходства между ними определяется максимумом корреляционной функции. Для оптимизации расчетов вместо волновых форм импульсов можно попытаться использовать характеризующие их параметры, представляющие собой для набора сигналов массив табличных данных.

В работе рассмотрен вопрос о классификации размеченных импульсов методами машинного обучения. В ходе предварительной обработки с помощью взаимнокорреляционного метода было

выявлено 3 группы импульсов (1, 2, 3 соответственно), остальные импульсы отнесены к классу 0. Использовались 15 параметров волновых форм (признаков) и 1 целевая переменная – индекс группы, которые вместе составляли датасет для исследования. Из исходного датасета были исключены импульсы, относившиеся к типичным помехам в соответствии с условиями, налагаемыми на среднюю частоту AF и амплитудно-временной параметр сигнала RA: $50 < AF < 550$ кГц, $1 < RA < 100$ В/с. Эти диапазоны обусловлены амплитудно-частотной характеристикой измерительного канала «датчик АЭ – предварительный усилитель – аналоговый фильтр – цифровой фильтр» и физическими ограничениями на скорость нарастания сигнала.

Для анализа датасета с целью классификации импульсов были использованы стандартные методы ML: Random forest, XGBoost, CatBoost. Данные делились на обучающую и тестовую выборку со стратификацией в соотношении 65% к 35% ввиду малого числа импульсов для тестирования модели. К данным применялись разные способы уравнивания числа объектов разных классов для обучения: undersampling, oversampling, SMOTE. Лучший результат получен с применением SMOTE. Наиболее подходящие параметры для модели подбирались с помощью Optuna. Проводилась кросс-валидация (от 5 до 30 выборок), оценивались метрики f1-score, precision, recall. Кроме того, был использован алгоритм AdaBoost для оценки устойчивости выделенных групп импульсов, обученный на всем фильтрованном датасете [Индаков и др., 2025].

Так как классы 1, 2 и 3 малочисленны и представляют собой «полезный» сигнал на общем фоне импульсов, был проведен поиск аномалий в данных на полном датасете (unsupervised) с использованием моделей Isolation forest, One-class SVM и LOF с подбором параметра contamination/nu с помощью Optuna. В качестве метрики использовалось число импульсов классов 1-3, распознанных алгоритмом как аномалия.

Результаты. Для образцов метапесчаника получены слабые корреляции между номером зоны и b-value, между номером зоны и активностью ТАЭ (рис. 2), между средним размером зерна и активностью ТАЭ. Корреляция между средним размером зерна и b-value практически полностью отсутствует. Для отдельных зон отбора, таких как 1 или 4, замечен слабый тренд на увеличение b-value с ростом активности, для зоны 2 он выражен сильнее (рис. 2).

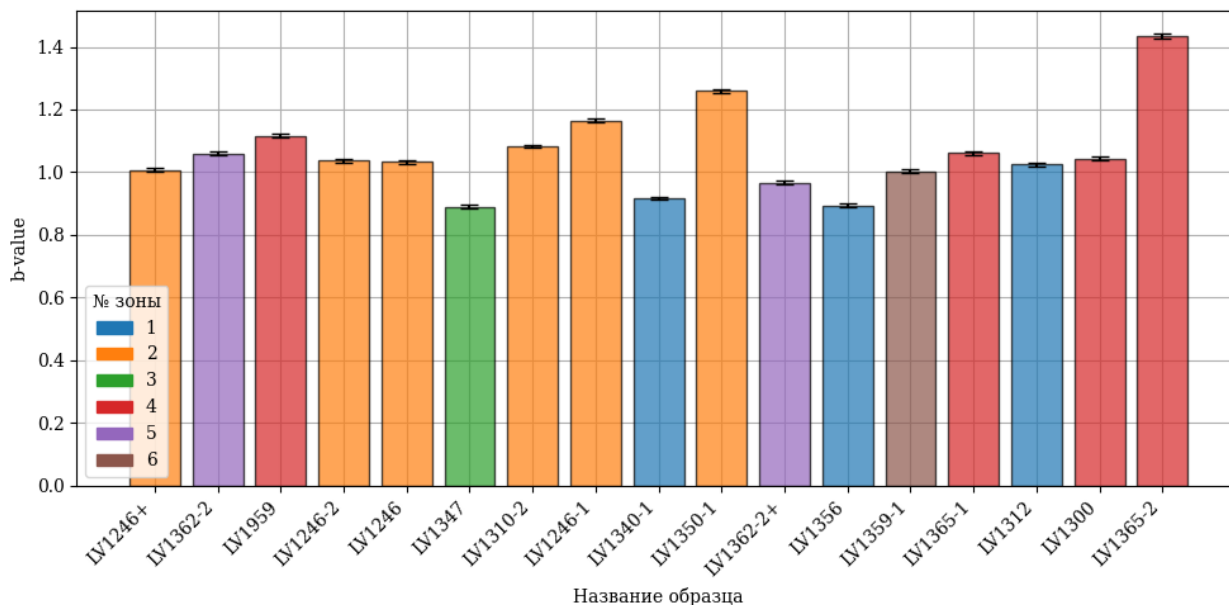


Рис. 2. Гистограммы среднего за этап нагрева b-value для образцов метапесчаника, упорядоченные по возрастанию средней активности ТАЭ

Наблюдается рост размера зерен с номером зоны отбора (рис. 3). Это можно объяснить тем, что при метаморфизме с ростом температуры и давления растет вероятность частичного расплавления минералов. После этого при уменьшении давления и температуры происходит перекристаллизация. Чем больше объем, затронутый частичным плавлением, тем больше размер новых сформированных зерен.

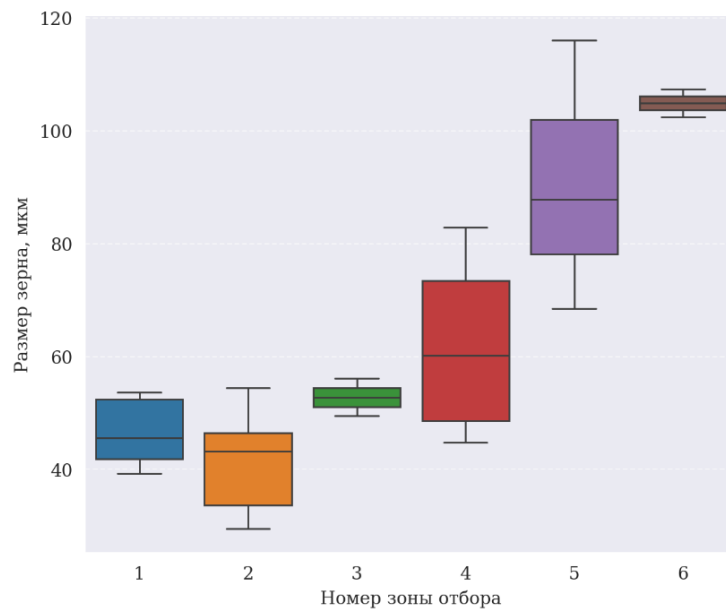


Рис. 3. Зависимость размера зерна от зоны отбора для каждой микрофотографии масштаба 200 мкм образцов метапесчаников (диаграммы размаха)

Параметры волновых форм импульсов AF и RA показывают слабую корреляцию с активностью ТАЭ и *b*-value. Для всех образцов средние значения AF и RA принадлежат области правее прямой AF = RA, что соответствует зоне преобладания трещин сдвига. Тем не менее, эти значения довольно близки к прямой AF = RA, что не позволяет однозначно утверждать о преобладании одного типа трещин над другим. Это характерно как для величин AF и RA, рассчитанных на отдельных этапах нагрева/охлаждения, так и для всего эксперимента.

В подавляющем большинстве использованных методов машинного обучения импульсы третьего исходного кластера были выделены лучше прочих двух, как в задаче классификации, так и в задаче поиска аномалий. Суммарно, анализ полученных результатов позволяет предположить, что импульсы из третьего исходного кластера связаны с трещиной, которая активируется при температуре около 600°C и при дальнейшем нагреве начинает активно расти с увеличением энергии импульсов более чем в 2 раза (максимальная амплитуда больше первоначальной на 9 дБмкВ). Импульсы из третьего кластера не наблюдаются на этапе охлаждения, что говорит об отсутствии условий роста для трещины.

Также отсутствие кластеров импульсов для образца песчаника, не подвергнувшегося предварительному механическому нагружению, с большой вероятностью говорит о различии механизмов термического разрушения без предварительного механического нагружения и после него [Индаков и др., 2025].

Литература

1. *Великославинский Д.А.* Метаморфические зоны в Северном Приладожье и оценка температур метаморфизма кианитового и андалузитового типов регионального метаморфизма // Метаморфические пояса СССР. Л.: Наука. 1971. С. 61–69.
2. *Елизаров С.В., Букатин А.В., Ростовцев М.Ю., Терентьев Д.А.* Новинки программного обеспечения АЭ систем семейства A-Line // В мире неразрушающего контроля. 2008. №3. С. 18–21.
3. *Индаков Г.С., Казначеев П.А., Майбук З.Ю. Я., Подымова Н.Б., Краюшкин Д.В.* Отслеживание развития разрушения с помощью кластеризации импульсов термически стимулированной акустической эмиссии при отсутствии локации // Геофизические исследования. 2025. Т.26. №2. С. 99–124.
4. *Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Смирнов В.Б., Бондаренко Н.Б.* К вопросу об анализе статистики событий акустической эмиссии по данным одиночного датчика в экспериментах с термическим разрушением горных пород // Геофизические исследования. 2019. Т.20. №1. С. 52–64.
5. *Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В.* Оборудование и методика исследования термоакустоэмиссионных эффектов памяти в горных породах // Сейсмические приборы. 2019. Т.55. №1. С. 29–45.

6. *Комаров А.Г.* Программное обеспечение для обработки данных АЭ испытаний // Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018): Всероссийская конференция с международным участием (Тольятти, 28 мая – 1 июня 2018 года): сборник материалов / под ред. Д. Мерсон, А. Виноградов. Тольятти: Изд-во ТГУ. 2018. С. 41–43.
7. *Подымова Н.Б., Пономарев А.В., Казначеев П.А., Багдасарян Т.Э., Матвеев М.А., Индаков Г.С.* Количественная оценка характерных размеров зерен лабораторных образцов горных пород методом широкополосной оптико-акустической спектроскопии // Физика земли. 2024. №6. С. 93–111.
8. *Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Бернар П.* Особенности развития сейсмической роевой активности в коринфском рифте в 2000–2005 гг. // Физика Земли. 2011. №7. С. 54–66.
9. *Liu X., Liu Z., Li X., Cui J.* Acoustic Emission RA-Value and Granite Fracture Modes Under Dynamic and Static Loads // *Advances in Acoustic Emission Technology* / ed. by G. Shen, J. Zhang, Z. Wu. – Cham: Springer International Publishing. 2019. P. 141–153.
10. *Papadakis E.P.* From Micrograph to Grain-Size Distribution with Ultrasonic Applications // *Journal of Applied Physics*. 1964. Vol.35. No.5. P. 1586–1594.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СМЕЩЕНИЙ НА ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ РАЗЛОМА

Казначеев П. А.¹, Краюшкин Д. В.¹, Майбук З.-Ю. Я.¹, Пономарев А. В.¹, Патонин А. В.², Закржевская Н. А.¹, Мигунов И. Н.¹, Кох В. В.¹

¹ – *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; p_a_k@mail.ru*

² – *Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Ярославская область, пос. Борок, Россия*

Введение. Моделирование процессов, связанных с неустойчивостью больших объемов горных пород, крупномасштабным разрушением в земной коре и, в конечном счете, с тектоническими землетрясениями, опирается на основные гипотезы (модели) сейсмического цикла, в соответствии с которыми можно выделить два направления лабораторных экспериментов. Первое – это лабораторные модели с изначально существующим нарушением в экспериментальном образце, как правило, разломом (разрывом), резкое смещение бортов которого моделирует землетрясение. Они основаны на таких моделях сейсмического цикла, предполагающих наличие существующих сейсмогенных разломов, как, например, дилатантно-диффузионная модель с прерывистым проскальзыванием по разлому («stick-slip» - «стик-слип») [Brace, Byerlee, 1966; Nur, 1972], модель консолидации [Добровольский, 1984] и др. Второе – это лабораторные модели с исходно цельным образцом, при нагружении которого происходит разрушение. Они основаны, например, на модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [Myachkin et al., 1972; Соболев, 2019]. В общем случае, строго разделять между собой указанные лабораторные модели достаточно сложно. В исходно однородном образце может быть сформирован разрыв, и при дальнейшем нагружении исследоваться его развитие. Также возможна модель сейсмической брешы [Mogi, 1978/79; Sobolev et al., 1987], в которой среда предполагается ненарушенной между существующими разрывами (макротрещинами) и т.д.

Важно отметить, что все модели базируются на предположении о непрерывности процесса деформации земной коры, ключевой характеристикой которой является скорость деформации (см., например, [Ребецкий, 2005, 2018]). Следовательно, определяющим условием для получения новых знаний как в лабораторных, так и натуральных исследованиях, является возможность отслеживания деформации на разных масштабных уровнях. Под масштабными уровнями понимается не столько масштаб сети регистрации деформации в пространстве, сколько масштаб регистрации величины скорости деформации на разных стадиях сейсмического цикла, в натуральных или модельных условиях.

Исследования смещений на модели сейсмогенного разлома при активном участии сотрудников ИФЗ РАН и организационной роли члена-корр. РАН Соболева Г.А. начались в 1980х гг. В [Spetzler et al., 1991] приведены результаты экспериментов по исследованию влияния свойств контактирующих поверхностей модельного разлома на трех вариантах слайдер-моделей в условиях двухосного сжатия. Первая модель содержит два или три блока, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда и прижатых друг к другу нормальным усилием, где основная регулируемая нагрузка, обеспечивающая сдвиговое напряжение на контактах, прикладывалась к подвижному блоку, а другой блок (или два боковых блока в трехблоковой конфигурации) оставались неподвижными. Таким образом, один или два контакта моделируют один или два разлома. Этот вариант моделирования сейсмогенных разломов был одним из первых вариантов моделей сейсмогенного разлома и используется в разных вариациях, включая крупномасштабные модели, в современных экспериментах (см., например, [Hoskins et al., 1968; Dieterich, 1972; Ohnaka, 1973; Ohnaka, 2013; Kilgore et al., 2012; Kocharyan et al., 2022]).

Вторая модель – с двумя блоками, имеющих форму треугольных призм. Призмы прижаты друг к другу по тем поверхностям, которые не образуют прямые углы с остальными поверхностями, и таким образом формирующие модель разлома. Т.е. вся модель имеет форму прямоугольного параллелепипеда, разрезанного по диагонали, и разрез моделирует один разлом. Нормальное напряжение на модели разлома задается приложением усилия на больших боковых поверхностях параллелепипеда, сдвиговое – на меньших поверхностях. Такая модель активно исследовалась и исследуется в настоящее время (см., например, [Dieterich et al., 1978; Ohnaka et al., 1986; Ohnaka, 2013; Beeler et al., 2017]).

Третья модель состоит из двух блоков горной породы, имеющих форму наклонных параллелепипедов и контактирующих по одной из больших наклонных поверхностей (рис. 1а), тоже моделирует один разлом и дополнительно позволяет уменьшить нестабильность нормального усилия

при событиях проскальзывания [Spetzler et al., 1991]. На модели этого типа исследовалось влияние типа породы, свойств поверхностей контакта [Spetzler et al., 1991], влияние таких триггерных воздействий, как модуляция нагрузки [Sobolev et al., 1993; Sobolev et al., 1996], малые импульсные упругие воздействия [Sobolev et al., 1993; Соболев и др., 2016], инъекция флюида в зону модельного разлома [Соболев и др., 2006; Соболев и др., 2010].

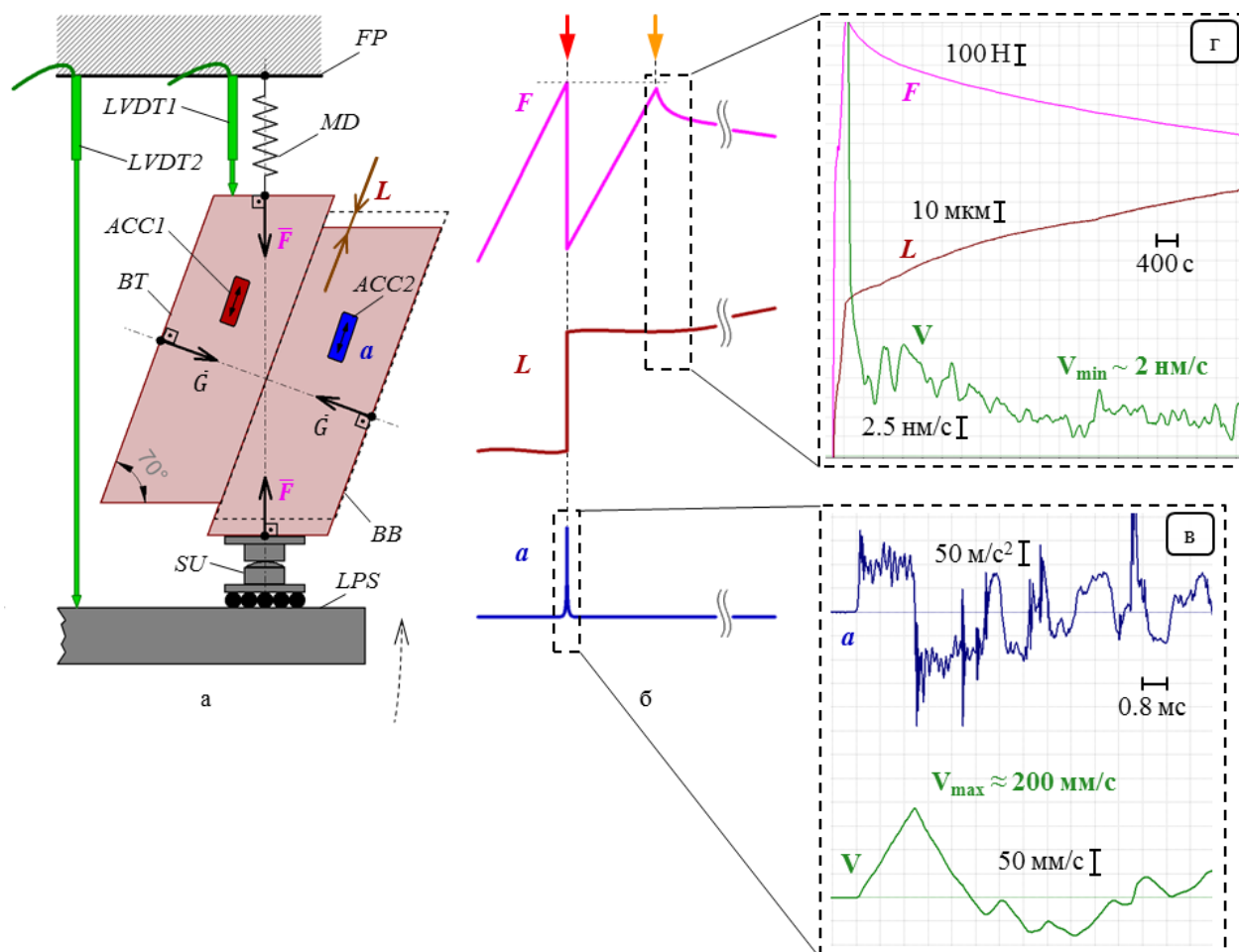


Рис. 1. (а) – Лабораторная модель сейсмогенного разлома; (б) – Схематическое изображение изменения основных измеряемых величин при моделировании сейсмического цикла; (в, г) – примеры зарегистрированных величин для быстрой подвижки (модельное землетрясение): (в) – вдоль разлома, (г) – для медленного проскальзывания («асейсмический крип») по разлому. FP – верхняя неподвижная часть нагружающей установки, LPS – нагружающее плечо рычажного пресса (фрагмент), SU – блок механического сопряжения, BT и BB – верхний и нижний блоки модели разлома, MD – пружинный динамометр, LVDT1 и LVDT2 – датчики измерения деформации динамометра и вертикального смещения всей модели, ACC1 и ACC2 – акселерометры, F – основное нагружающее усилие, G – нормальное усилие, L – смещение вдоль модели разлома (для наглядности показано только на блоке BB), a – ускорение блока BB. Красная стрелка – момент модельного землетрясения, оранжевая – момент остановки нагружения при субкритической нагрузке; штриховой линией со стрелкой условно показано движение рычага пресса при нагружении

Методика и результаты. В 2022 году по инициативе Соболева Г.А. были возобновлены эксперименты на слайдер-модели, описанной [Соболев и др., 2006; Соболев и др., 2010], для чего была проведена её модернизация, прежде всего, в части датчиков и регистрирующей аппаратуры. Были созданы новые измерители смещения и нагрузки на основе LVDT (Linear Variable Differential Transformer – трансформаторы с изменяющимся коэффициентом трансформации при прямолинейном смещении сердечника) с предельным разрешением по смещению порядка 0.1-1 мкм и 0.1-1 Н соответственно, новые измерители ускорения на основе пьезоэлектрических акселерометров в варианте с динамическим амплитудным диапазоном до ± 500 g и частотным диапазоном до 15 кГц и в варианте с амплитудным диапазоном до ± 2 g и частотным диапазоном до 400 Гц [Краюшкин и др., 2023].

За счет такого сочетания высокочувствительных (LVDT) и быстродействующих (пьезоэлектрические акселерометры) датчиков стала возможна оценка кинематических и силовых величин движений на разломе на разных масштабах времени, от быстрых подвижек как модельных

землетрясений, до медленного скольжения одного блока относительно другого как аналога асейсмического крипа. На рис. 1б схематично показана история нагружения и деформации, обеспечивающая достижение как быстрой подвижки при увеличении нагрузки до критического уровня (красная стрелка), так и медленного скольжения после увеличения нагрузки до субкритического уровня (оранжевая стрелка).

На рис. 1в показан сигнал ускорения a , зарегистрированный одним из акселерометров при эпизоде быстрой подвижки, и восстановленная на его основе скорость смещения блока V , максимальное значение которого достигает почти 200 мм/с. Эти значения близки к данным других авторов, где авторы используют малоинерционные (высокочастотные) датчики смещения или виброперемещения и высокоскоростную регистрацию (см., например, скорости смещения 20-50 мм/с в [Beeler et al., 2017]). Отметим, что именно такая регистрация обеспечивает корректную оценку скоростей смещения, поскольку высокоинерционные датчики (например, как LVDT) не позволяют охарактеризовать быстрое движение при модельных землетрясениях с высокой детальностью по времени. Натурные данные показывают соответствие скоростей смещений модельных землетрясений скоростям смещений бортов разломов при «нормальных» (до 5 м/с) и «низкочастотных» (до 0.01-0.1 м/с) землетрясениях, при событиях медленного скольжения (1-100 мм/с) [Кочарян, 2016].

На рис. 1г показаны сигналы усилия F и смещения L , зарегистрированные LVDT-датчиками после нагружения до субкритической нагрузки, и скорость смещения V , которая рассчитана после этого момента на основе смещения L и минимальное значение которой около 1-2 нм/с. Полученная величина численно близка к нижней границе скорости асейсмического крипа в активных разломных зонах, составляющей 10-1000 нм/с (1-10 см/год) и оцененной по геодинамическим данным (см., например, [Кочарян, 2016; Стеблов и др., 2010]).

Заключение. В работе кратко представлены результаты экспериментального исследования разномасштабных движений в виде смещений на лабораторной слайдер-модели сейсмогенного разлома. В экспериментах регистрировался и анализировался перечень различных физических параметров, прежде всего, силовых и кинематических величин. Оценка разномасштабных движений стала возможна за счет сочетания разных датчиков кинематических величин – как высокочувствительных (LVDT-датчики смещения), так и быстродействующих (пьезоэлектрические акселерометры). Наблюдались медленные движения вдоль разлома (аналог асейсмического крипа), быстрые высокоамплитудные движения (модельные землетрясения), а также быстрые малоамплитудные движения, предположительно связанные со смещениями, неоднородными по разлому. Динамический диапазон регистрируемых скоростей смещений составляет от 1-2 нм/с до 100-200 мм/с (разница в 100 млн. раз). Отметим, что указанный динамический диапазон скоростей смещения является не мгновенным динамическим диапазоном одного датчика, а достигается за счет комплексирования и обработки данных с датчиков разного типа.

Литература

1. Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР. 1984. 189 с.
2. Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Патонин А.В., Соболев Г.А., Краюшкин Д.В., Кох В.В. Лабораторное моделирование смещений блоков горных пород: малоамплитудные быстрые движения в экспериментах на слайдер-модели разлома // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2024. Т.69. №2. С. 216–236.
3. Казначеев П.А., Непеина К.С., Краюшкин Д.В., Кох В.В., Индаков Г.С., Мигунов И.Н., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Казначеев С.А. Контроль качества измерения сейсмических и акустических сигналов в режиме реального времени при геофизическом мониторинге // Наука и технологические разработки. 2024. Т.103. №3. С.27–52.
4. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС. 2016. 424 с.
5. Краюшкин Д.В., Казначеев П.А., Кох В.В., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В. Разработка измерителя ускорений в широких амплитудном и частотном диапазонах для лабораторной модели разлома // Сейсмические приборы. 2023. Т.59. №3. С. 58–74.
6. Пономарев А.В., Казначеев П.А. Развитие экспериментальных исследований разрушения горных пород в ИФЗ РАН с первой половины 1970-х годов // Динамические процессы в гесоферах. 2024. Т.16. №3. С. 36–44.

7. *Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения, метаморфизм и модель очага землетрясения // Доклады Академии наук. 2005. Т.400. С. 372–377.
8. *Ребецкий Ю.Л.* Закономерности разрывообразования в земной коре и тектонофизические признаки метастабильности разломов // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т.9. №3. С. 629–652.
9. *Соболев Г.А.* Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ // Физика Земли. 2019. №1. С. 166–179.
10. *Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В., Круглов А.А., Луцкий В.А., Цывинская Ю.В.* Влияние инъекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте // Геология и геофизика. 2006. Т.47. С. 608–621.
11. *Соболев Г.А., Пономарев А.В., Майбук Ю.Я.* Инициирование неустойчивых подвижек – микроземлетрясений упругими импульсами // Физика Земли. 2016. №5. С. 51–69.
12. *Соболев Г.А., Пономарев А.В., Майбук Ю.Я., Закржевская Н.А., Понятовская В.И., Соболев Д.Г., Хромов А.А., Цывинская Ю.В.* Динамика акустической эмиссии при инициировании водой // Физика Земли. 2010. №2. С.50–67.
13. *Стеблов Г.М., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И., Грекова Т.А.* Динамика Курило-Камчатской зоны субдукции по данным GPS // Физика Земли. 2010. №5. С. 77–82.
14. *Beeler N., Kilgore B., McGarr A., Fletcher J., Evans J., Baker S.* Observed source parameters for dynamic rupture with non-uniform initial stress and relatively high fracture energy // Journal of Structural Geology. 2012. Vol.38. P. 77–89.
15. *Brace W.F., Byerlee J.D.* Stick-Slip as a Mechanism for Earthquakes // Science. 1966. Vol.153. P. 990–992.
16. *Cebry S.B.L., Ke C.Y., Shreedharan S., Marone C., Kammer D.S., McLaskey G.C.* Creep fronts and complexity in laboratory earthquake sequences illuminate delayed earthquake triggering // Nat. Commun. 2022. Vol.13. Art ID 6839. P. 1–9.
17. *Dieterich J.H.* Time-dependent friction in rocks // J. Geophys. Res. 1972. Vol.77. P. 3690–3697.
18. *Hoskins E.R., Jaeger J.C., Rosengren K.J.* A medium-scale direct friction experiment // Int. J. Rock Mech. Mineral. Sci. 1968. Vol.5. P. 143–154.
19. *Kilgore B., Lozos J., Beeler N., Oglesby D.* Laboratory Observations of Fault Strength in Response to Changes in Normal Stress // ASME. J. Appl. Mech. 2012. Vol.79(3). Art. ID 031007. P. 1–10.
20. *Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Gridin G.A., Morozova K.G., Hongwen J., Panteleev I.A.* Laboratory Study on Frictional Behavior of Rock Blocks of Meter Scale. Methods and Preliminary Results // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2022. Vol.58(6). P. 929–940.
21. *Mogi K.* Two kinds of seismic gaps // Pure and Appl. Geophys. 1978/79. Vol.117. P. 1172–1186.
22. *Nur A.* Dilatancy, pore fluids, and premonitory variations of ts/tp travel times // BSSA. 1972. Vol.62(5). P. 1217–1222.
23. *Ohnaka M.* Experimental studies of stick-slip and their application to the earthquake source mechanism // Journal of Physics of the Earth. 1973. Vol.21. P. 285–303.
24. *Ohnaka M.* The Physics of Rock Failure and Earthquakes. Cambridge. 2013. 281 p.
25. *Sobolev G.A., Getting I.G., Spetzler H.* Laboratory study of the strain field and acoustic emissions during the failure of a barrier // J. Geophys. Res. 1987. Vol.92. No.9. P. 9311–9318.
26. *Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Koltsov A.V., Smirnov V.B.* Simulation of Trigger Earthquakes in the Laboratory // PAGEOPH. 1996. Vol.47. No.2. P. 345–355.
27. *Sobolev G.A., Spetzler H., Koltsov A., Chelidze T.* An Experimental Study of Triggered Stick-slip // PAGEOPH. 1993. Vol.140. No.1. P. 1–16.
28. *Spetzler H., Sobolev G., Koltsov A., Zang A., Getting I.C.* Some properties of unstable slip on rough surfaces // PAGEOPH. 1991. Vol.137. No.1-2. P. 95–112.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОРАДАРА ОКО-3 АБ-100МЗ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ И КОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА)

Королева А. О.^{1,2}

¹ – *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; kao@ifz.ru*

² – *Институт географии РАН, г. Москва, Россия*

Введение. В последние десятилетия на российской части Фенноскандии ведутся интенсивные исследования, направленные на изучение постледниковой сейсмоструктурной активности, которая происходит в результате разгрузки земной коры после деградации оледенения [Никонов и др., 2014; Шварев и др., 2021]. При постепенном постледниковом поднятии суши активизировались древние разломы, происходили сильные землетрясения, которые значительно влияли на рельеф местности, а также приводили к катастрофическим последствиям для окружающей среды. В исследованиях особое внимание уделяется палеосейсмологическим методам, которые позволяют реконструировать древние сейсмические события.

В рамках полевых исследований Фенноскандинавской палеосейсмической группы ИФЗ РАН проведены рекогносцировочные работы на участках с известными по литературным и фондовым источникам следами палеоземлетрясений, а также выявленными по результатам обработки дистанционных данных (космических снимков высокого разрешения и цифровых моделей рельефа) сейсмодетекциями в рельефе и рыхлых отложениях. Работы проведены с целью обоснования детальных палеосейсмологических работ, выявления очаговых зон и параметризации палеоземлетрясений. Работы носили комплексный характер и осуществлялись при сочетании: а) геолого-геоморфологических маршрутных обследований; б) документации разрезов рыхлых отложений и скальных обнажений с палеосейсмогенными деформациями; в) отбора образцов рыхлых отложений для инструментального датирования; г) георадиолокационного профилирования вкост простирания предполагаемых сейсмоактивных тектонических нарушений в пределах акваторий и суши с геодезическим (DGPS) и батиметрическим (эхолот GARMIN) сопровождением. В данной работе представлены первичные результаты интерпретации георадиолокационных исследований в пределах акватории озера Сегозеро, губы Масельгской.

Цели исследований:

- Определение взаимоотношений глубинных и поверхностных структур, выявление пространственной связи блоковой структуры кристаллического фундамента и деформаций в рельефе и рыхлых отложениях в пределах акваторий;
- Поиск и обнаружение нетипичных форм рельефа, нарушений залегания слоев в пределах изучаемых акваторий;
- Определение эффективности работы георадаром ОКО-3 антенным блоком 100 МГц.

Район работ. Район работ расположен на юго-восточной периферии Фенноскандинавского щита в окрестностях озера Сегозеро (Медвежьегорский район). Выбор участка работ связан с наличием в этом районе признаков значительных палеогидрологических перестроек позднеледникового времени, каналов стока и палеодельт приледниковых водоемов, пространственно совпадающих с крупнейшим разломным узлом, представленным субширотным взбросо-надвигом, определяющим долину р. Кумса и серией сбросо-сдвигов северо-западного простирания, трассирующихся по линейным котловинам, соединяющим оз. Сегозеро, долину р. Кумса и северную часть Повенецкого залива Онежского озера (рис. 1). На рис. 1 изображены фрагменты двух карт. Первая – тектоническая карта [Сыстра, 1991], на которой выделяется субширотный взбросо-надвиг, вторая – карта четвертичных отложений [Niemi et al., 1993], на которой выделяется оз, вытянутый по простиранию субширотного взбросо-надвига и по долине реки Кумса (озы – это ледниковые формы рельефа, линейно вытянутые валообразные гряды).

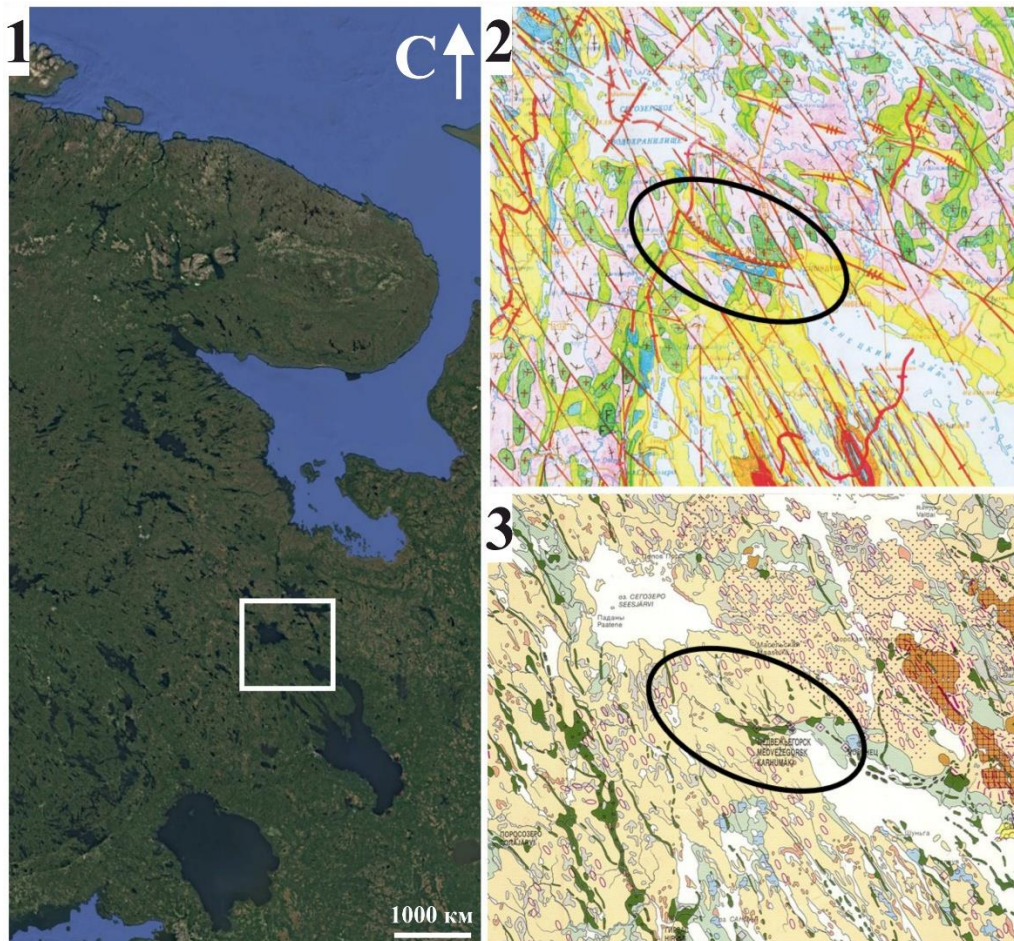


Рис. 1. Район работ. 1 – фрагмент космоснимка Google Earth, белой рамкой помечен район исследований; 2 – тектоническая карта [Сыстра, 1991], черным овалом выделен субширотный взбросо-надвиг, 3 – карта четвертичных отложений [Niemela et al., 1993], черным овалом выделен оз по простирацию субширотного взбросо-надвига по долине реки Кумса

В Центральной Карелии озовые гряды наиболее часто встречаются между Сегозером и Онежским озером. Геоморфологические исследования, проведенные за последние годы, анализ картографического материала, дешифрирование аэрофотоснимков, анализ структурных и текстурных особенностей отложений, слагающих озовые гряды, позволили выделить следующие типы озовых образований:

- Озы, образовавшиеся во внутриледниковых и подледниковых трещинах.
- Озы инверсионного типа (короткие озовые гряды, встречающиеся среди сложных водно-ледниковых образований).
- **Озы, связанные с разломами в фундаменте.** Это крупные, четко выраженные в рельефе гряды или системы параллельных гряд протяженностью в несколько десятков километров. Они достигают значительной высоты (до 35-45 м) при крутизне склонов в 24-28°. Одной из основных отличительных особенностей данного типа образований является их приуроченность к местам проявления новейших тектонических нарушений и зонам разломов небольшой глубины, как правило, омоложенных в четвертичное время [Ильин, Лак, 1973].

В статье В.А. Ильина и Г.Ц. Лака [1973]. приводится иллюстрация связи озовых гряд с разломами. Наблюдается прямая взаимосвязь озов с трещинной тектоникой (рис. 2).

Благодаря детальному анализу блоково-разломной структуры и сопоставлению морфолинеаментов с озовыми грядами в статье [Шварев, 2019] удалось подтвердить, что большая часть линейных флювиогляциальных образований (озовых гряд) на территории Карельского перешейка взаимосвязана с морфолинеаментной (разломной) сетью. Отмечено прямое соответствие между разрывами и озовыми грядами, пространственное подобие, повторение конфигурации, ориентировки водно-ледниковых образований и разломной сети.

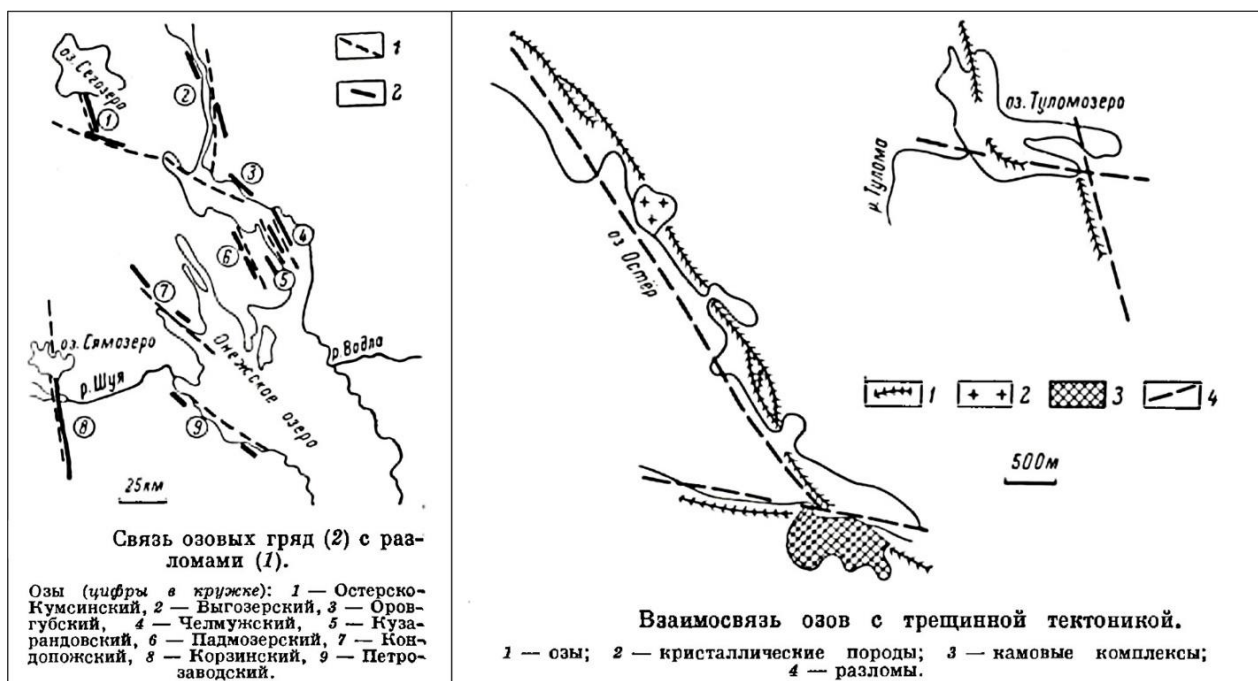


Рис. 2. Иллюстрации из статьи [Ильин, Лак, 1973]: 1 — связь озовых гряд с разломами, 2 — взаимосвязь озов с трещинной тектоникой

Методика. Георадиолокационные исследования проводились при помощи георадара ОКО-3 («Логис-Геотех») и экранированной антенны с частотой 100 МГц по профилям (рис. 3). Метод основан на излучении импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от различных объектов исследуемой среды. В данном случае речь идет о границах раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью [Старовойтов, 2023].

Использование георадиолокации в палеосейсмологии позволяет идентифицировать зоны разломов, определять стратиграфию, выявлять смещения и нарушения залегания слоев.

На данном участке (губа Масельская) выполнено порядка 50 акваторных профилей. В работе представлены первичные результаты интерпретации полученных данных на акватории. Исходя из условий съемки развертка была выбрана 1600 н.с., накопление — 32, скорость лодки составила 7 км/ч. Съемка и обработка результатов осуществлялись в программном обеспечении «CartScan».

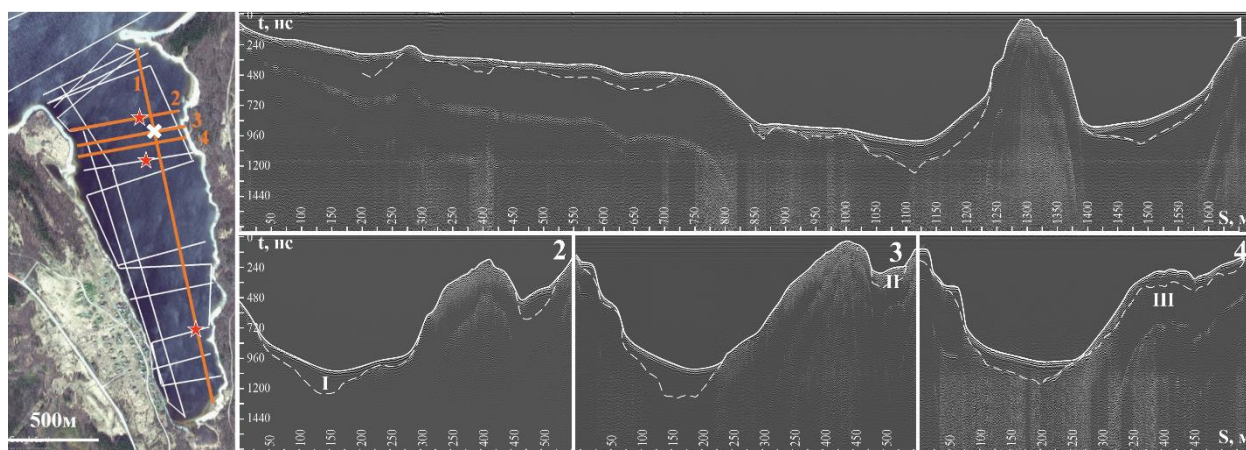


Рис. 3. Схема профилей в губе Масельская и временные разрезы: 1 — радарограмма продольного профиля 052, 2-4 — радарограммы поперечных профилей 097, 098, 099 (100 МГц). Белым крестом отмечено место подхода вершины останца к поверхности воды. Красными звездами отмечены места фотографий подводного дна

Интерпретация. На одной из радарограмм был обнаружен интересный объект — останец неизвестного происхождения. Основание останца находится на глубине около 16 метров, а его вершина подходит практически к поверхности воды, достигая глубины около 1 метра (отмечено на рис. 2 белым крестом). Данный останец вызвал интерес ученых, ведь это достаточно нетипичное образование для, казалось бы, однообразного дна озера. Во время полевой интерпретации данных

была выдвинута гипотеза, что данная структура является продолжением озовой гряды, которая тянется с берега. Для более детального исследования структуры были проведены поперечные профили: на радарограммах поперечных профилей отмечалась впадина, отделяющая данную структуру от берега. Углубление в озовой гряде могло быть связано с временными тальми потоками, которые разрушили горные породы и вынесли материал к основанию губы Масельгской (там наблюдается значительное уменьшение глубины акватории и большой объем аллювиальных отложений). Однако, как принято считать, озовые гряды образуются во время деградации ледника в условиях интенсивного таяния, после чего их значительная трансформация обычно не происходит ввиду иссякания потоков талых вод. Вполне возможно, что процесс образования данного останца не обошелся без воздействия сейсмических событий. Что касается георадиолокационной волновой картины – обнаруженный останец, по всей видимости, состоит из флювиогляциальных отложений, так как на георадарограммах отмечается большое количество дифрагированных волн, связанных с крупными обломками. На участке впадины, отделяющей останец от берега, наблюдаются смещения осей синфазности отраженных волн и изменения их угла наклона, изменение по горизонтали типа волновой картины и увеличение амплитуды отраженного сигнала в зоне разрыва. Перечисленные характеристики георадиолокационной картины являются признаками разрывных нарушений.

Дополнительно к исследованиям нетипичного рельефа дна озера проводились наблюдения эффективности работы антенного блока 100 МГц, а именно определение соответствия волновой картины к конкретному типу отложений. По результатам интерпретации полученных данных выделено 3 георадиолокационных комплекса:

- Донные отложения (параллельно-слоистая волновая картина)
- Ледниковые отложения (хаотичная волновая картина с большим количеством дифрагированных волн)
- Породы кристаллического фундамента (местами прозрачная волновая картина, местами повышенная амплитуда отраженного сигнала, зашумленные данные и большое количество хаотичных отражений, связанных, по всей видимости, с сильной разрушенностью горных пород).

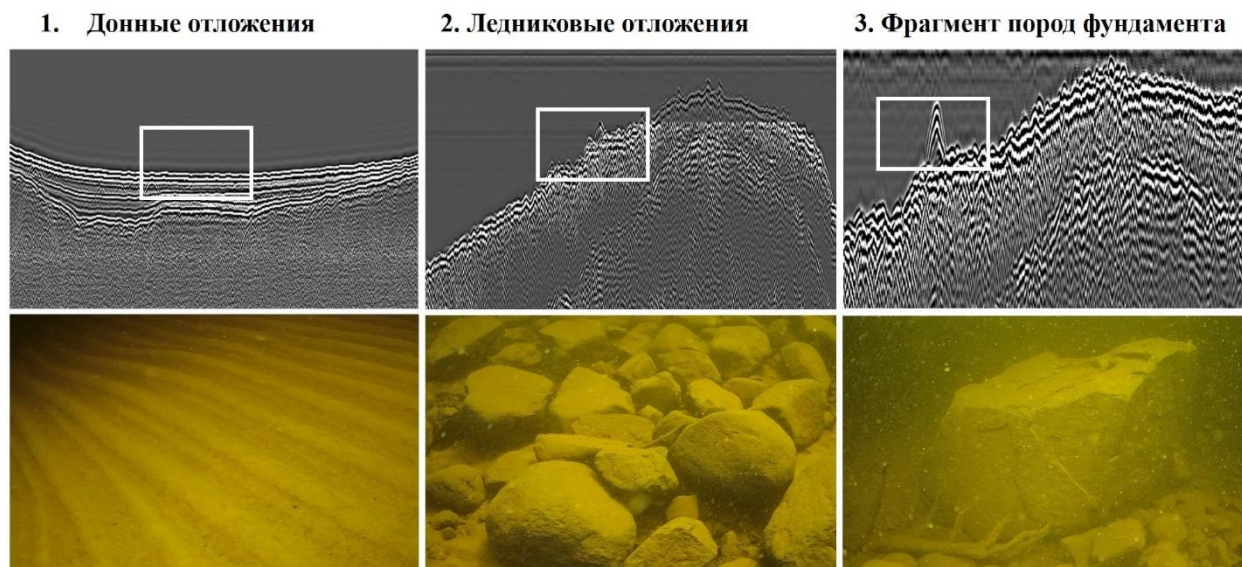


Рис. 4. Сопоставление георадиолокационной картины с фотографиями донных отложений: 1 – донные отложения, пески; 2 – ледниковые отложения, глыбы и валуны; 3 – фрагмент пород фундамента (фото Лугового Н.Н. ИГ РАН)

Предположения о соотношении типов отложений с конкретными волновыми картинками удалось подтвердить при помощи подводной съемки с использованием Chasing Gladius Underwater Drone. Он был погружен в трех точках, помеченных на рисунке 3 звездами (рис. 3). Как и следовало ожидать, параллельно-слоистая волновая картина соответствует пескам, а хаотичная волновая картина с большим количеством дифрагированных волн соответствует скоплениям валунов и глыб. Что касается пород фундамента, за три спуска под воду не было обнаружено выхода на поверхность дна пород кристаллического фундамента, не перекрытых слоем донных отложений. Однако была обнаружена крупная глыба коренных пород, острые грани которой свидетельствуют о незначительной обработке и близком расстоянии до источника сноса, вероятно, приразломной зоны

дробления. Аналогичные глыбы и зоны дробления наблюдаются по всему южному побережью Сегозера и в непосредственной близости от точки погружения. На радарограмме в этом месте отмечаются «усы дифракции», что характерно для подобных объектов. Что примечательно, в отличие от других глыб и валунов, обнаруженных на дне и по бортам озера, эта глыба имеет острые, неокатанные борта и грани, что, наиболее вероятно, является свидетельством постледниковых подвижек.

Результаты:

1. Удалось детально изучить рельеф дна оз. Сегозеро;
2. Удалось проследить распределение донных отложений, которые в основном наблюдаются во впадинах, в большинстве своем повторяя кровлю фундамента. На склонах и возвышенных участках фундамента слой донных отложений минимален;
3. Выявлено пространственное распределение водно-ледниковых образований (озовых гряд);
4. Выделены георадиолокационные комплексы, волновые картины подтверждены фотографиями с подводного дрона;
5. Установлена эффективность антенны ОКО-3 АБ100М3 при изучении дна водоемов и выявлении нетипичных локальных структур на дне акваторий.

Работы выполнены в рамках Государственного задания ИФЗ РАН № FMWU-2025-0038: «Мультидисциплинарные исследования разномасштабных пространственно-временных свойств сейсмического процесса и его неустойчивости для развития методов оценки и прогноза сейсмической опасности».

Автор выражает благодарность научному руководителю группы Швареву С.В., а также Луговому Н.Н. и Комарову А.О. за помощь в проведении съемки и предоставленные фотографии.

Литература

1. Ильин В.А., Лак Г.Ц. Четвертичная геология и геоморфология восточной части Балтийского щита // Карельский филиал институт геологии. АН СССР. 1973 г. Вып.13.
2. Никонов А.А., Шварев С.В., Сим Л.А., Родкин М.В., Бискэ Ю.С., Маринин А.В. Скальные палеосейсмодетформации на Карельском перешейке (ключевой участок “Пещеры Иностранцева”, Ленинградская область) // ДАН. 2014. Т.457. С. 591–596.
3. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: уч. пособие по курсу «Георадиолокация» – 2-е изд. М.: «КДУ»; «Добросвет». 2023. 258 с.
4. Тектоническая карта Республики Карелия. М. 1:1000000 / Автор Ю.И. Сыстра. Петрозаводск, Институт геологии КарНЦ РАН. 1991.
5. Шварев С.В. Постледниковые сейсмогенные деформации озовой гряды в северной части Карельского перешейка // Геоморфология. 2019. №3. С. 19–35.
6. Шварев С.В., Николаева С.Б., Королева А.О. Морфологические проявления постледниковой сейсмической активности Имандра-Колвицкого активного разлома в Лувеньгской очаговой зоне (Мурманская область) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты: ФГБУН ГИ КНЦ РАН. 2021. Т.18. С. 425–429.
7. Quaternary deposits of Finland and northwestern part of Russian Federation and their resources. Scale 1:1 000 000 / Eds J. Niemela, I. Ekman, A. Lukashov. Petrozavodsk: Geol. Surv. of Finland and Rus. Acad. of Sci. Institute of Geology, 1993.

ИЗУЧЕНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ, МОРФОЛОГИИ И КИНЕМАТИКИ РАЗЛОМОВ ОАЗИСА ХОЛМЫ ЛАРСЕМАНН (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ 70-Й РАЭ

Крикун Н. С.¹, Гордеев Н. А.², Ушаков Д. Е.¹, Бабенко И. А.¹, Таловина И. В.¹

¹ – Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия; nskrikun@gmail.com

² – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Антарктида является наименее изученным континентом Земли. Общая её площадь составляет около 14 миллионов км², из которых более 99% круглый год покрыто льдом, и лишь 0,3% приходится на обнажения коренных пород. С другой стороны, такие участки (оазисы) характеризуются практически идеальной обнажённостью, что в сочетании с труднодоступностью территории делает особенно актуальным привлечение дистанционных методов для её изучения и позволяет экстраполировать полученные результаты на смежные районы, покрытые ледником [Егоров и др., 2025].

Холмы Ларсеманн расположены в пределах кратона Восточной Антарктиды, на побережье залива Прюдс (берег Ингрид Кристенсен, Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида) и представляют собой цепь низких прибрежных холмов и островов протяжённостью около 17 километров и площадью примерно 60 км². Открытая часть включает многочисленные острова, шхеры и полуострова Стурнес, Брокнес, Миррор. В пределах последних двух расположен район данного исследования.

В рамках данного исследования, как отмечалось ранее, работы проводились на полуостровах Брокнес и Миррор, расположенных в восточной части холмов Ларсеманн. Территория сложена серией глубокометаморфизованных пород от верхней амфиболитовой до гранулитовой фаций [Stüwe et al., 1989; Carson et al., 1995], которые прорваны раннепалеозойскими гранитоидами. На северо-востоке п-ва Миррор, расположенного в восточной части территории исследований, обнажаются мезопротерозойские мафические гранулиты формации Нелла и более поздние лейкократовые гнейсы формации Жуньшань. Остальная часть п-ва сложена неопротерозойскими парагнейсами формации Браттстранд различного состава [Geology of the Larsemann Hills, 2007; Grew et al. 2012; Tong et al. 2019].

Изучение тектонических деформаций холмов Ларсеманн заключалось в исследовании морфологии, кинематики, масштаба и классификации разрывных нарушений, времени их заложения, анализе элементов залегания и морфологии пликативных структур. Методически работу можно разбить на три основных блока: 1) полевые работы; 2) полуавтоматический линеаментный анализ данных ДЗЗ и рельефа; 3) автоматический структурный геоморфологический анализ методом Л.А. Сим. Задачи в рамках каждого блока решались независимо друг от друга, а в конце проводилась корреляция полученных данных для построения итоговой схемы разрывных нарушений и ее анализа.

Наибольшую сложность при выполнении исследования вызвало определение кинематики выявленных структур, что прежде всего связано с интенсивной выветрелостью пород и несколькими этапами тектоно-термальной переработки. Для наиболее крупных дизъюнктивов использовались имеющиеся данные о структурных взаимоотношениях различных геологических подразделений с учетом их элементов залегания (сланцеватости, полосчатости, гнейсовидности). Активно применялись методы структурного анализа по палеткам Гзовского и Хэнкока [Ребецкий и др., 2017] с опережающими разломами более высоких порядков, кинематику которых можно было оценить в ходе полевых работ по относительному смещению трещин, тел пегматитов, кварцевых жил и др. Также использовались данные о характере распределения полей напряжений в земной коре [Ребецкий, 2020]. Пример последовательного анализа разрывного нарушения, расположенного в центральной части п-ва Брокнес (северо-западнее хребта Расти), по данным полевых работ приведен на рис. 1. Разлом выделен по долине северо-восточного простирания в ходе рекогносцировочных маршрутов. В бортах долины, высотой до 50 м, отмечаются зоны дробления (1), мощностью до 15 м, и опережающие трещины отрыва, восток-северо-восточного простирания, протяженностью до 30 м, выполненные кварц-полевошпатовыми пегматитами. Породы в бортах долины подвержены интенсивной гидротермально-метасоматической переработке, что также указывает на тектоническую природу долины.

Результаты аэрофотосъемки и последующей интерпретации построенных детальных цифровых моделей рельефа (3) и 3D-моделей (4), показывают, что закартированный разлом является оперяющим к субмеридиональному разрывному нарушению. Данные о замеренном распределении трещиноватости указывают на преобладающее восток-северо-восточное простирание трещин отрыва, вкрест оси максимального растяжения (σ_1), что позволяет по сопоставлению с палетками гзовского определить сбросо-правосдвиговую кинематику для рассматриваемого разлома.

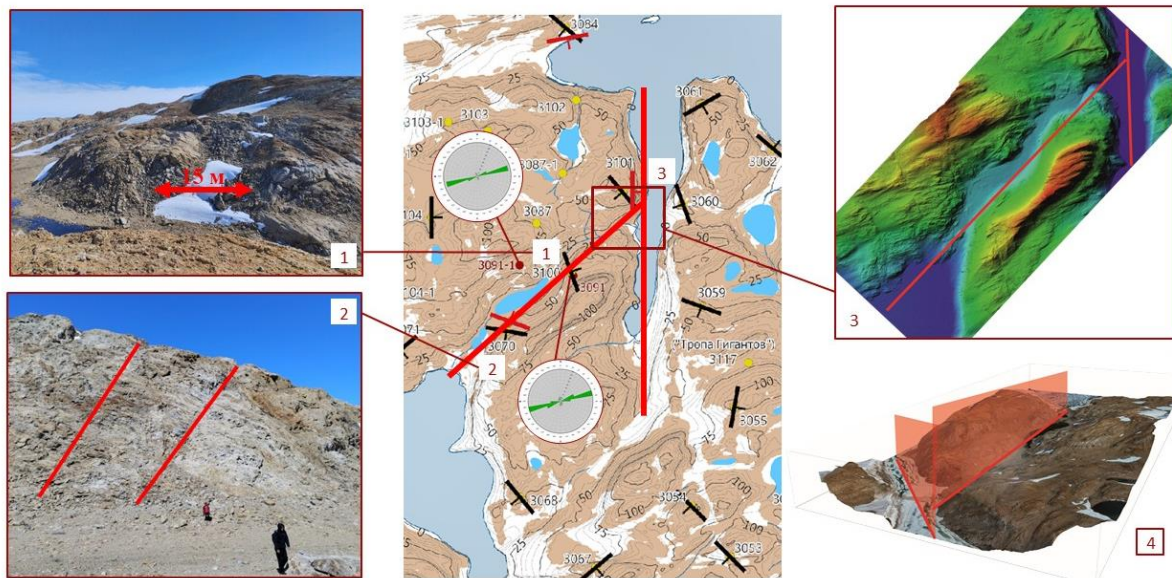


Рис. 1. Пример сопоставления результатов полевых работ для изучения разрывных нарушений №10 и №12 (рис. 2), размещенный на схеме замера элементов залегания. Диаграммы роз показывают преобладающее восток-северо-восточное простирание для трещин отрыва в бортах долины. 1 – Зоны дробления в северо-западном борту долины; 2 – Трещины отрыва, в выступе в юго-восточном борту, выполненные пегматитами; 3 – Детальная цифровая модель рельефа, построенная по результатам аэрофотосъемки; 4 – 3D-модель зоны сочленения разломов, построенная по результатам аэрофотосъемки

Параллельно с полевыми работами выполнялся полуавтоматический анализ по методике, описанной в работе [Таловина и др., 2022], данных дистанционного зондирования, ортофотоплана местности и цифровой модели рельефа с последующей корреляцией полученных линеаментных схем для подтверждения тектонической природы выделенных линеаментов.

Отдельный блок был посвящен изучению восточной части холмов Ларсеманн с использованием автоматического структурно-геоморфологического метода Л.А. Сим (ПО SimSGM [Гордеев, Молчанов, 2019]). Метод основан на статистических данных о сопряженной системе R, R' сколов и отрывов. Их взаимное расположение возможно подразделить на 4 типа напряженного состояния по правому сдвигу и на 4 напряженных состояния по левому сдвигу. В некоторых случаях возможным становится выявление сложных геодинамических обстановок транспрессии и транстенсии.

На заключительном этапе осуществлялось сопоставление результатов полевых работ с линеаментными сетями, полученными в ходе дешифрирования, и данными структурно-геоморфологического метода в ПО QGIS. Предварительные результаты проведенного комплексного анализа позволили построить схему дизъюнктивных структур восточной части холмов Ларсеманн (рис. 2). Наиболее крупными разломами в пределах территории исследований являются структуры северо-западного и субмеридионального простираний. С учетом длительной и сложной эволюции региона установление времени заложения выделенных структур представляется комплексной и трудной задачей. Однако предполагается, что активация северо-западных разломов происходила в раннем палеозое в режиме транстенсии, поскольку они выступали в качестве магмоподводящих каналов для раннепалеозойских интрузий (разломы 2, 3). Это наиболее глубокие и крупные структуры, определяющие блоковое строение территории, что подтверждается результатами площадных магниторазведочных работ [Gorelik et al., 2025]. При этом амплитуда вертикальных подвижек может составлять более одного километра, что объясняет выходы древних мезопротерозойских гранулитов на северной оконечности п-ва Миррор. Наличие обстановок транстенсии в раннем палеозое ставит под сомнение формирование складчатого пояса залива Прюдс на заключительных этапах сборки Гондваны.

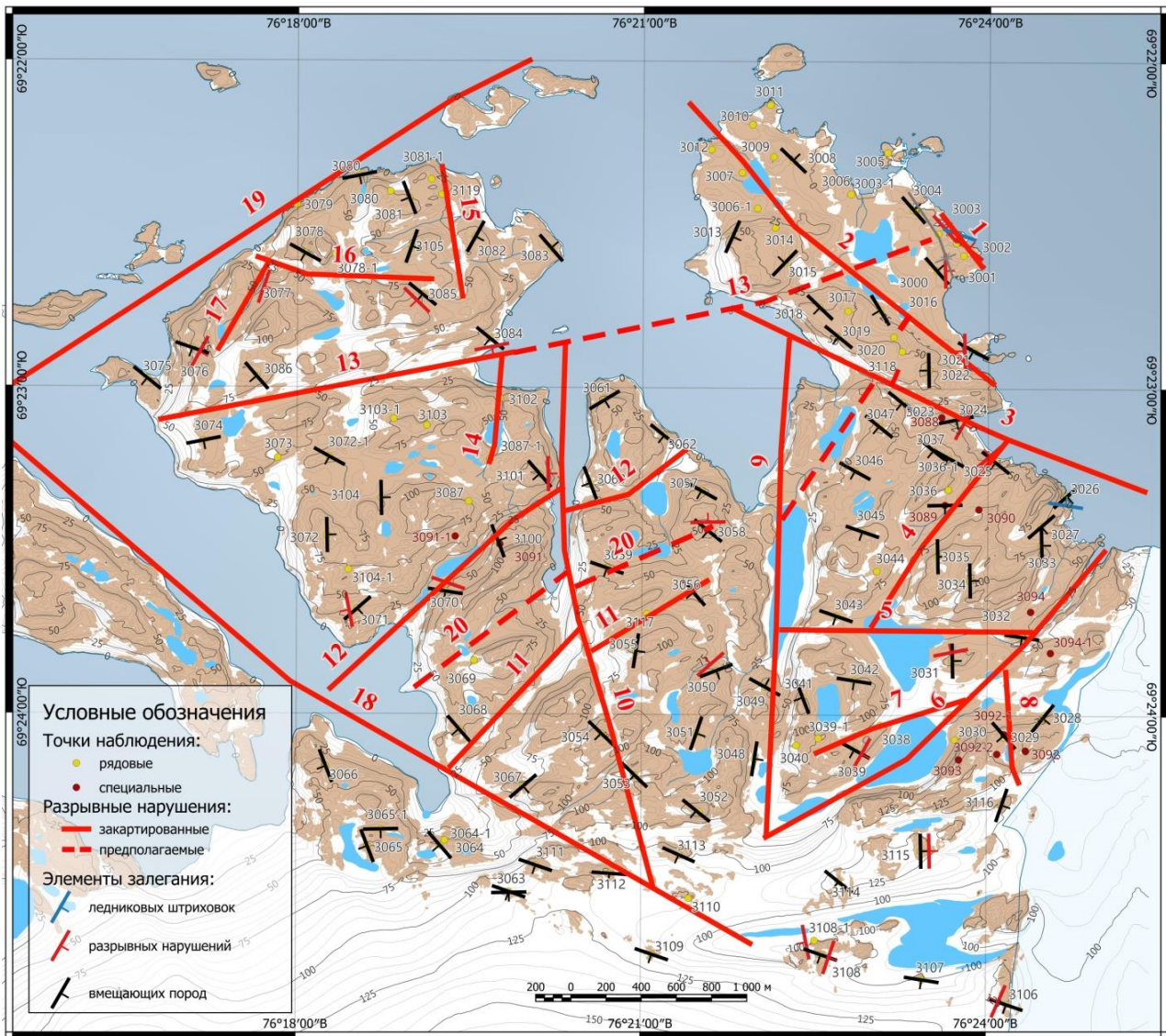


Рис. 2. Предварительная схема разрывных нарушений восточной части холмов Ларсеманн, размещенная на топографической основе, построенной по материалам цифровой базы данных SCAR (ver. 7.0) международного ГИС-проекта Quantarctica 3.2

Результаты апатит-трекового анализа гранитоидов показывают резкий подъем территории в мезозое или даже кайнозое [Chen et al., 2010], который связывают с заложением и эволюцией рифта Ламберта, расположенного в 200 км восточнее холмов Ларсеманн [Баранов, Лобковский, 2025]. Субмеридиональные разломы, простирающие которых соответствует простираению рифта, могут являться следствием этих событий. Наличие правосдвиговой компоненты в кинематике данных структур указывает на их трансензионную природу. В то же время их более поздняя активность по сравнению с другими разрывными нарушениями территории подтверждается на примере разлома 10. Кроме того, рассматриваемый разлом ярко выражен в рельефе по глубокому шхеру, в бортах которого отмечают следы смещения по субмеридионально простирающемуся правому сдвигу. Также необходимо подтвердить кинематику выделенных структур и оценить распределение полей напряжений с использованием автоматического структурно-геоморфологического метода Л.А. Сим, реализованного в виде программного обеспечения SimSGM [Гордеев, Молчанов, 2019]. Данные о распределении современных полей напряжений показывают, что в пределах холмов Ларсеманн преобладает обстановка сжатия в северо-восточном направлении, что может быть связано с инверсией горизонтальных напряжений после внедрения интрузий в результате активной эрозии [Ребецкий, 2023]. Полученные в ходе полевых работ результаты хорошо согласуются с автоматическим анализом в ПО SimSGM, что демонстрирует высокую надежность использования данного метода для изучения дизъюнктивных структур древних платформ.

Продолжающиеся работы по исследованию напряженного состояния территории холмов Ларсеманн позволили уточнить региональное поле напряжений для всей территории. В настоящий момент выявлены кинематические данные по всем известным разломам исследуемой территории (13 правых, 13 левых сдвигов). Некоторые из них формируют сопряженную систему. Всего сделано 57 реконструкций локальных напряженных состояний, по которым видно, что преобладающее сжатие в регионе исследования ориентировано в субширотном / северо-восточном простирании. Среди всех дешифрованных трещин выявлены два доминирующих простирания – субширотное первого ранга и субмеридиональное второго ранга. Пространственное распределение разломов следующее: первого ранга несколько диагональных восток-северо-восточных и запад-северо-западных, пересекаемые разломами второго ранга субширотного и северо-восточного простираний.

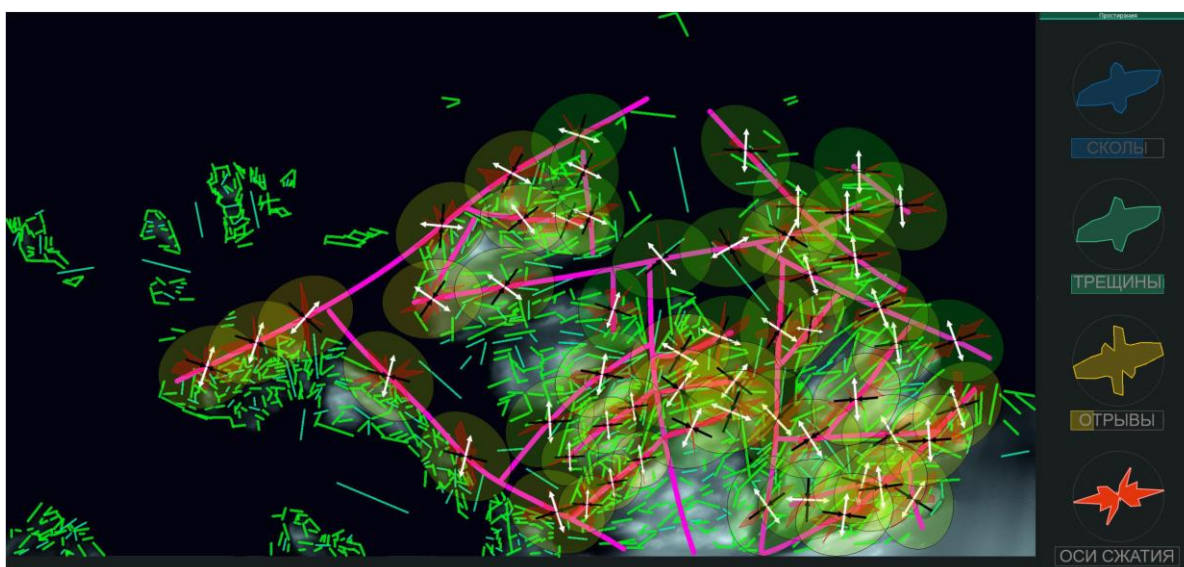


Рис. 3. Схема распределения неотектонических напряжений холмов Ларсеманн. Розовые линии – разломы по комбинированной съемке (геология, геоморфология, геофизика (см.рис.2)). Черные стрелки-штрихи – оси максимального сжатия; белые стрелки-штрихи – оси максимального растяжения. Справа на схеме – блок роз-диаграмм, построенных по количеству в штуках и простиранию элементов. В порядке сверху вниз: СКОЛЫ; ТРЕЩИНЫ – сводное количество сколов и отрывов; ОТРЫВЫ; ОСИ СЖАТИЯ. Салатовые линии – сколы; бирюзовые линии – отрывы

Для подтверждения выявленных закономерностей в тектонической эволюции холмов Ларсеманн в дальнейшем планируется расширить район исследований, включив в него западную часть холмов Ларсеманн и более крупный оазис Вестфоль, расположенный к северо-востоку. Разработанная методика идентификации разрывных нарушений может быть использована для изучения других оазисов Восточной Антарктиды.

Авторы выражают искреннюю признательность Российской антарктической экспедиции, АО «Аэрогеодезия», А.В. Запрудскому, Г.Д. Горелику и коллективу станции Прогресс, в особенности Д.В. Шепелеву и Д.Р. Халимову, за поддержку и техническую помощь в успешной реализации программы геолого-геофизических работ.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSRW-2024-0003, а также FMWU-2025-0036 "Создание тектонофизической и геомеханической моделей коры и литосферы Крыма и Северного Причерноморья".

Литература

1. Бабенко И.А., Таловина И.В., Ушаков Д.Е., Крикун Н.С. Пегматиты оазиса Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида: новые полевые геологические и геофизические данные // Записки Горного института. 2025. Т.273. С. 65–79.

2. Баранов А.А., Лобковский Л.И. Геодинамические процессы, кайнозойский рифтогенез и механизм образования глубочайших впадин на суше в Антарктиде // Записки Горного института. 2025. Т.273. С. 15–25.
3. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука. 1975. 536 с.
4. Гордеев Н.А., Молчанов А.Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. 2019. №2. С. 25–33.
5. Егоров А.С., Агеев А.С., Шуклин И.А., Марков А.Н., Лукин В.В., Горелик Г.Д., Грохотов Е.И. О подобии глубинного строения фундамента и генезиса формирования впадин восточного фланга Восточной Антарктиды и региона озера Байкал // Записки Горного института. 2025. Т.273. С. 26–41.
6. Ребецкий Ю.Л. Поле глобальных коровых напряжений Земли // Геотектоника. 2020. №6. С. 3–24.
7. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. М.: ГЕОС. 2017. 234 с.
8. Таловина И.В., Крикун Н.С., Юрченко Ю.Ю., Агеев А.С. Дистанционные методы исследования в изучении структурно-геологических особенностей строения о. Итуруп (Курильские острова) // Записки Горного института. 2022. Т.254. С. 158–172.
9. Carson C., Dirks P.H.G.M., Hand M.P., Sims J.P., Wilson C.J.L. Compressional and extensional tectonics in low-medium pressure granulites from the Larsemann Hills, East Antarctica // Geological Magazine. 1995. Vol.132. No.2. P. 151–170.
10. Chen X., et al. Cenozoic Exhumation of Larsemann Hills, East Antarctica: Evidence from Apatite Fission-track Thermochronology // Acta Geologica Sinica – English Edition. 2010. Vol.84. No.2. P. 306–320.
11. Geology of the Larsemann Hills. Princess Elizabeth Land. Antarctica. 1:25 000 scale. First Edition. Canberra: Geoscience Australia, 2007.
12. Gorelik G.D., Senchina N.P., Ushakov D.E. Results of large-scale ground magnetic survey on the Broknes Peninsula (Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, East Antarctica) // Journal of Mining Institute. 2025. Vol.273. P. 123–135.
13. Grew E.S., Carson C.J., Christy A.G., Boger S.D. Boron- and phosphate-rich rocks in the Larsemann Hills, Prydz Bay, East Antarctica: Tectonic Implications // Geological Society, London, Special Publications. 2013. Vol.383. P. 73–94.
14. Stüwe K., Braun H., Peer H. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica // Australian Journal of Earth Sciences. 1989. Vol.36. No.2. P. 219–241.
15. Tong L., Liu Z., Li Z.-X., Liu X., Zhou X. Poly-phase metamorphism of garnet-bearing mafic granulite from the Larsemann Hills, East Antarctica: P-T path, U-Pb ages and tectonic implications // Precambrian Research. 2019. Vol.326. P. 385–398.

ОСНОВНЫЕ ЭНДОГЕННЫЕ ГЕОПАСНОСТИ В РОССИЙСКОМ СЕКТОРЕ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

Крылов А. А.^{1,2}

¹ – *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия; artyomkrlyv@ocean.ru*

² – *НГУ «Сириус», федеральная территория Сириус, Россия*

В настоящее время наблюдается активизация освоения российского сектора Арктики: строятся нефтегазовые терминалы, эксплуатируются добывающие платформы, возрастает роль Северного морского пути при транспортировке грузов. По мере потепления климата, наиболее выраженное именно в арктическом регионе, и уменьшения площади ледового покрова эта хозяйственная активность будет только увеличиваться. При этом для предотвращения возможных техногенных катастроф, связанных с эксплуатацией созданной и создаваемой инфраструктуры, при проектировании ее объектов необходимо проводить тщательную оценку сейсмической опасности и других потенциальных геологических опасностей.

При этом к потенциальным геологическим опасностям, связанным с глубинными процессами, относят, прежде всего, проявления сейсмичности и связанные с ней явления. Подвижки в активных разломных зонах под акваториями и сопровождающие их землетрясения могут быть взаимосвязаны с такими опасными природными явлениями, как подводные оползни, разжижение морских грунтов, цунами, подводный вулканизм, гидротермальная активность и сфокусированная разгрузка газа (газовые сипы) на морском дне.

В рамках настоящей работы был подготовлен сводный каталог землетрясений в российском секторе Арктики, объединяющий данные крупнейших электронных баз данных ЕГС РАН [База данных «Землетрясения России», 2023], ISC [International Seismological Centre, 2023], USGS [U.S. Geological Survey, 2023]. Базы данных ISC и USGS, в свою очередь, объединяют информацию, предоставляемую целым перечнем организаций и агентств. Также в сводный каталог добавлены сведения из каталогов, подготовленных по результатам обработки записей, полученных с помощью автономных донных сейсмостанций ИО РАН [Крылов и др., 2022, 2023]. Сводный каталог содержит сведения о датах и времени в очаге, координатах и глубинах очагов, магнитудах землетрясений и источниках информации примерно о 13000 сейсмических событий. Соответствующее распределение эпицентров представлено на рис. 1 на фоне схемы активных разломов.

Процессы генерации подводных оползней и активного выделения газа из морских осадков представляют интерес как самостоятельные виды геологических опасностей. Тем не менее, они, как правило, сопровождают активные тектонические процессы, поскольку динамические воздействия от землетрясений являются одними из основных триггеров при образовании оползней [Mosher et al., 2010], а также влияют на проницаемость пород и поровое давление, изменяя, таким образом, фильтрационные свойства геологической среды [Wang and Manga, 2010]. Это в свою очередь может влиять на интенсивность разгрузки газа и других компонентов геофлюида, проявиться в дестабилизации гидратов, массивном выбросе метана, образовании воронок различного диаметра (от метров до сотен метров), в просадке грунтов и других потенциальных георисках [Kusku et al., 2005; Shakhova et al. 2017]. На рис. 2 приведена схема пространственного расположения областей концентрации газовых сипов и областей с высокими рисками образования подводных оползней в российском секторе Северного Ледовитого океана.

На рис. 1-2 видно, что распределение активных разломов и очагов землетрясений в Арктическом регионе определяется, в первую очередь, положением активных геодинамических зон, связанных с уже сформировавшимися или формирующимися участками границы Евразийской и Североамериканской литосферных плит (хребет Гаккеля, Лаптевоморская рифтовая система). Сейсмической активностью хребта Гаккеля и направлением раздвиг обусловлена повышенная цунамиопасность восточного побережья Северной Земли и западного побережья Новосибирских островов.

Внутриплитная сейсмическая активность выражена слабее и связана с влиянием активных тектонических процессов в области оси спрединга на древние шовные зоны между крупными блоками земной коры и с омоложением соответствующих разломов. В частности, это наблюдается в пределах Баренцево-Карского шельфа. В западном секторе Российской Арктики также возможно наложение изостатических процессов.

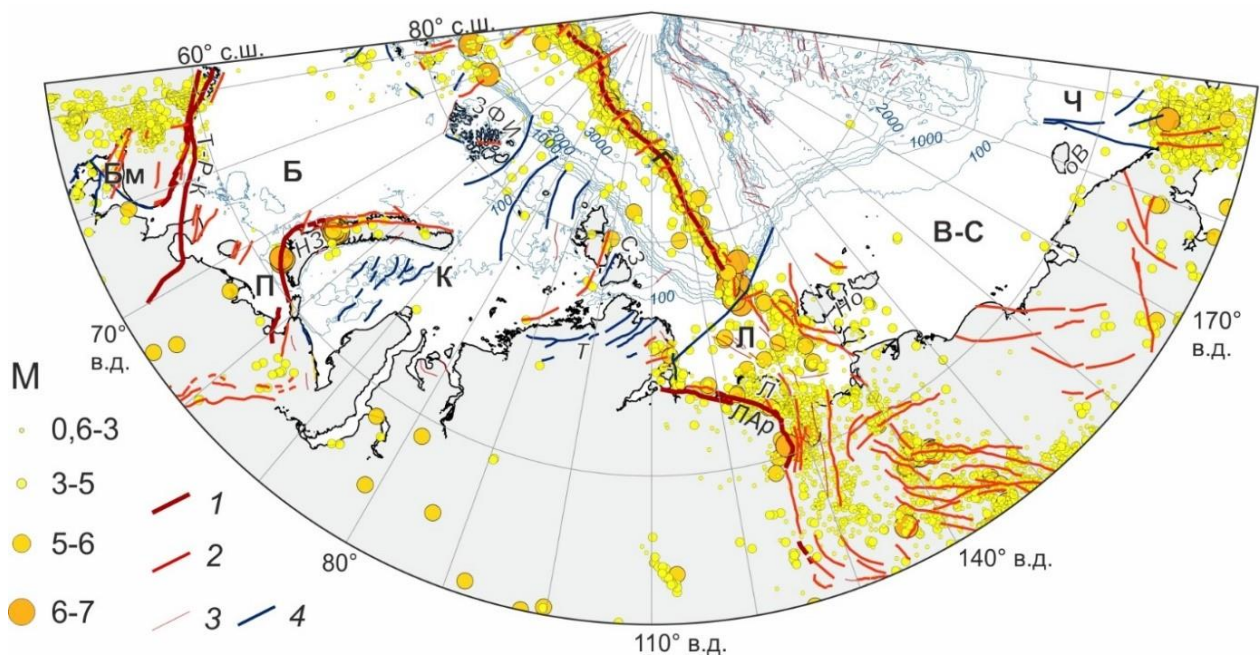


Рис. 1. Распределение эпицентров землетрясений и схема основных активных разломных зон арктической части России. М – магнитуды землетрясений; активные разломные зоны: 1 – магистральные, глубинные и долгоживущие разломы (Т-Р-К – линиямент Трольфьорд-Рыбачий-Кильдин; Г – рифтовая зона спредингового хребта Гаккеля; ЛАр – Лено-Анабарский разлом); 2 – региональные; 3 – мелкие разломы, выходящие на поверхность; 4 – возможные активные разломы. Моря: Б – Баренцево; Бм – Белое; П – Печорское; К – Карское; Л – Лаптевых; В-С – Восточно-Сибирское; Ч – Чукотское

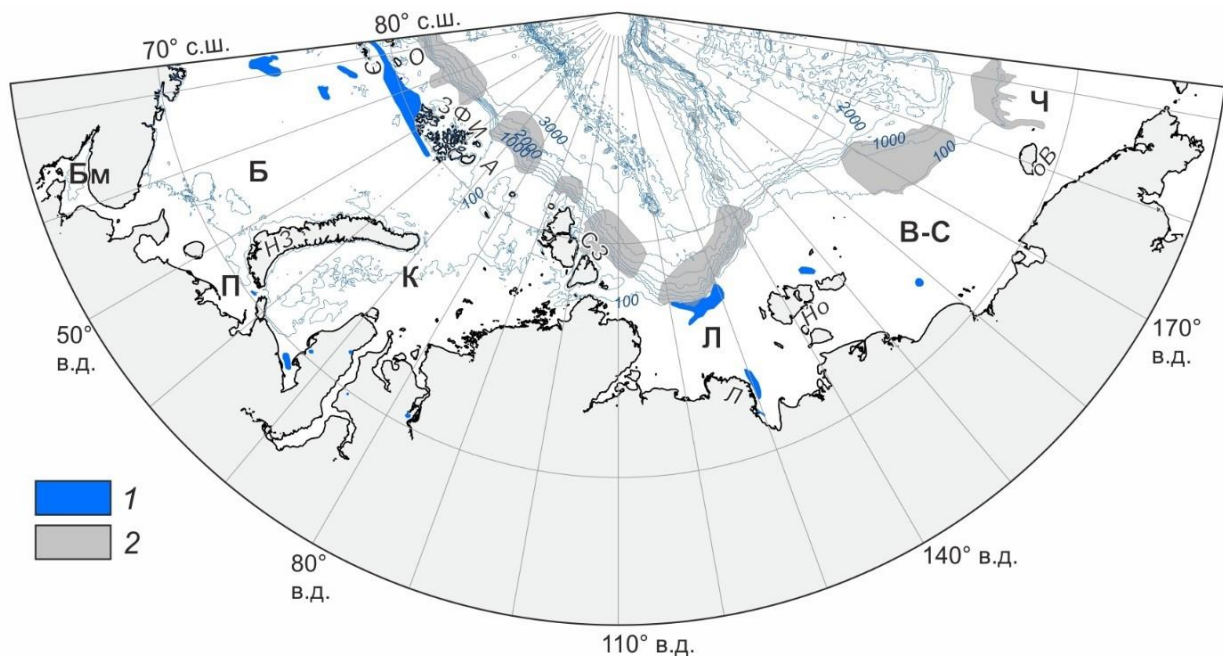


Рис. 2. Распределение полей газовых сипов (1) и областей высокого риска образования подводных оползней (2) в арктических морях России. Составлена по данным из работ, цитируемых в тексте. Моря: Б – Баренцево; Бм – Белое; П – Печорское; К – Карское; Л – Лаптевых; В-С – Восточно-Сибирское; Ч – Чукотское

Крупные провинции газовых сипов располагаются в наиболее тектонически активных зонах. Это, видимо, связано с повышенной проницаемостью геологической среды и повышенным тепловым потоком.

Распределение зон повышенного риска подводных оползней в российском секторе Арктики, на первый взгляд, определяется геометрией континентального склона Северного Ледовитого океана. Конфигурация самого континентального склона определяется историей развития Арктического региона в целом и раскрытием Евразийского и Американо-Азиатского бассейнов в частности.

Закономерности пространственного распределения и причинно-следственные связи между различными опасными геологическими явлениями мало исследованы, особенно для удаленных и труднодоступных арктических морей России. Радикальное расширение базы данных о морских геологических опасностях Арктического региона крайне необходимо для решения задачи их районирования.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке государственного задания РФ, проект № FMWE–2024–0018 (анализ положения крупных тектонических структур в арктических морях); Российского научного фонда, проект № 23-17-00125 (углубленный анализ данных по сейсмичности и разломам в море Лаптевых как наиболее сейсмически активном); и гранта государственной программы федерального округа «Сириус» «Научно-технологическое развитие федерального округа «Сириус», соглашение № 18-03 от 10.09.2024 (исследование геологических факторов формирования газовых просачиваний).

Литература

1. База данных «Землетрясения России». Единая геофизическая служба РАН. – URL: <http://eqru.gsras.ru>.
2. Крылов А.А., Лобковский Л.И., Рукавишников Д.Д., Баранов Б.В., Ковачев С.А., Дозорова К.А., Цуканов Н.В., Семилетов И.П. Новые данные о сейсмотектонике моря Лаптевых по наблюдениям донных сейсмостанций // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т.507. №1. С. 98–103.
3. Крылов А.А., Лобковский Л.И., Ковачев С.А., Баранов Б.В., Рукавишников Д.Д., Цуканов Н.В., Дозорова К.А., Семилетов И.П. Геодинамические режимы в Лаптевоморском регионе согласно новейшим сейсмологическим данным // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т.513. №2. С. 224–230.
4. *International Seismological Centre*. – URL: <https://www.isc.ac.uk>.
5. Kuscu I., Okamura M., Matsuoka H., Gökaşan E., Awata Y., Tur H., Şimşek M., Keçer M. Seafloor gas seeps and sediment failures triggered by the August 17, 1999 earthquake in the Eastern part of the Gulf of Izmit, Sea of Marmara, NW Turkey // *Marine Geology*. 2005. Vol.215. P. 193–214.
6. Mosher D.C., Shipp R.C., Moscardelli L., Chaytor J.D., Baxter C.D.P., Lee H.J., Urgeles R. (Eds.) *Submarine Mass Move-ments and Their Consequences*. Springer: Dordrecht, The Netherlands; Heidelberg, Germany; London, UK; New York, NY, USA. 2010. Vol.28. 818 p.
7. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Salyuk A., Rekant P., Kosmach D. Geochemical and geophysical evidence of methane release over the East Siberian Arctic Shelf // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010. Vol.115. C08007.
8. *U.S. Geological Survey*. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>.
9. Wang C.-Y., Manga M. Hydrologic responses to earthquakes and a general metric // *Geofluids*. 2010. №10. P. 206–216.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕКОВОЙ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГЕОМАГНИТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА БАЙКАЛЬСКОМ И АЛТАЙСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ ЗА 1997-2025 ГГ.

Кулешов Д. А.^{1,2}

¹ – Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия; kuleshovdmitalex@gmail.com

² – Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск, Россия

Введение. Вековой вариацией (ВВ) принято называть изменения элементов геомагнитного поля (ГМП) во времени, обусловленные процессами в земном ядре [Courtillot and Mouel, 1988].

ВВ ГМП, предположительно, возникают из-за движения жидкости в жидком ядре на глубинах 3000 км [Брагинский, 1978; Демина и др., 2008]. В то время как размеры сетей наблюдений находятся в пределах 500 км. Таким образом источники ВВ геомагнитного поля независимо от их конфигурации находятся гораздо глубже, чем источники литосферных аномалий, расположенных над поверхностью Кюри (на глубине ~ 10-20 км). Таким образом пространственное распределение ВВ ГМП может быть аппроксимировано полиномиальной поверхностью. Степень соответствующего полинома определяется размерами полигона и требуемой точностью выделения ВВ ГМП [Kuleshov et al, 2021].

Методика. Предлагаемый метод апробирован на данных ежегодных геомагнитных наблюдений на Алтайском (около 30 пунктов) и Байкальском (около 100 пунктов) геодинамических полигонах протяженностью ~120 и ~400 км соответственно в период с 1997 по 2024 гг. Выбор степени полинома для Алтайского полигона ограничен первым порядком (рис. 1), а для Байкальского – вторым (рис. 2). Степень полинома выбирается исходя из пространственного-временного распределения ГМП на интересующих участках по модели IGRF-13 [Alken et al., 2021] для Алтайского и IGRF-14 для Байкальского полигонов соответственно.

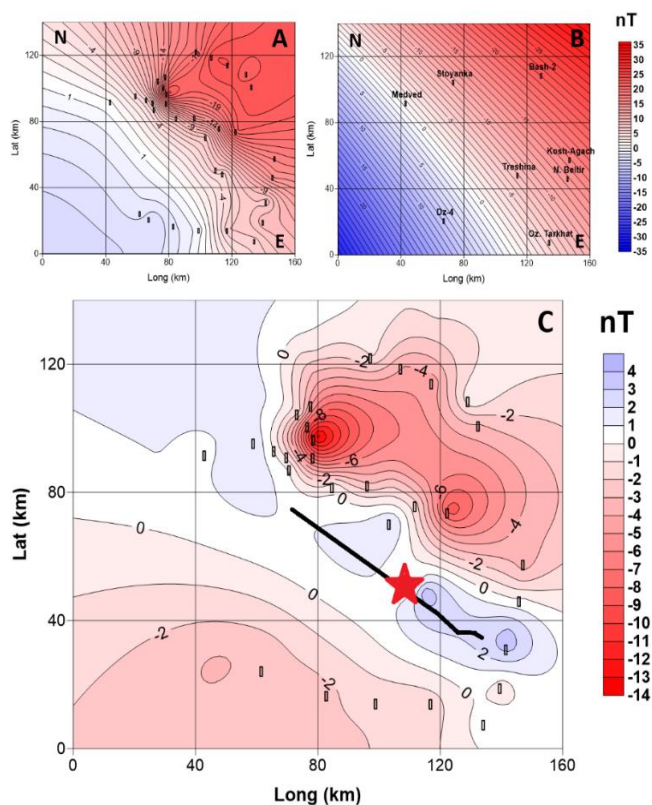


Рис. 1. Пространственное распределение изменений модуля вектора геомагнитной индукции за период 2004-2018 гг. для сети Алтай относительно пункта Медведь (А); (Б) – Вековой ход, определённый по экспериментальным наблюдениям; (В) – Изменение аномального магнитного поля, полученное после исключения векторного хода геомагнитного поля. Звездочкой отмечен эпицентр Чуйского землетрясения 27.09.2003 с $M=7.3$. Черной линией показана сейсмодислокация этого землетрясения [Kuleshov et al, 2021]

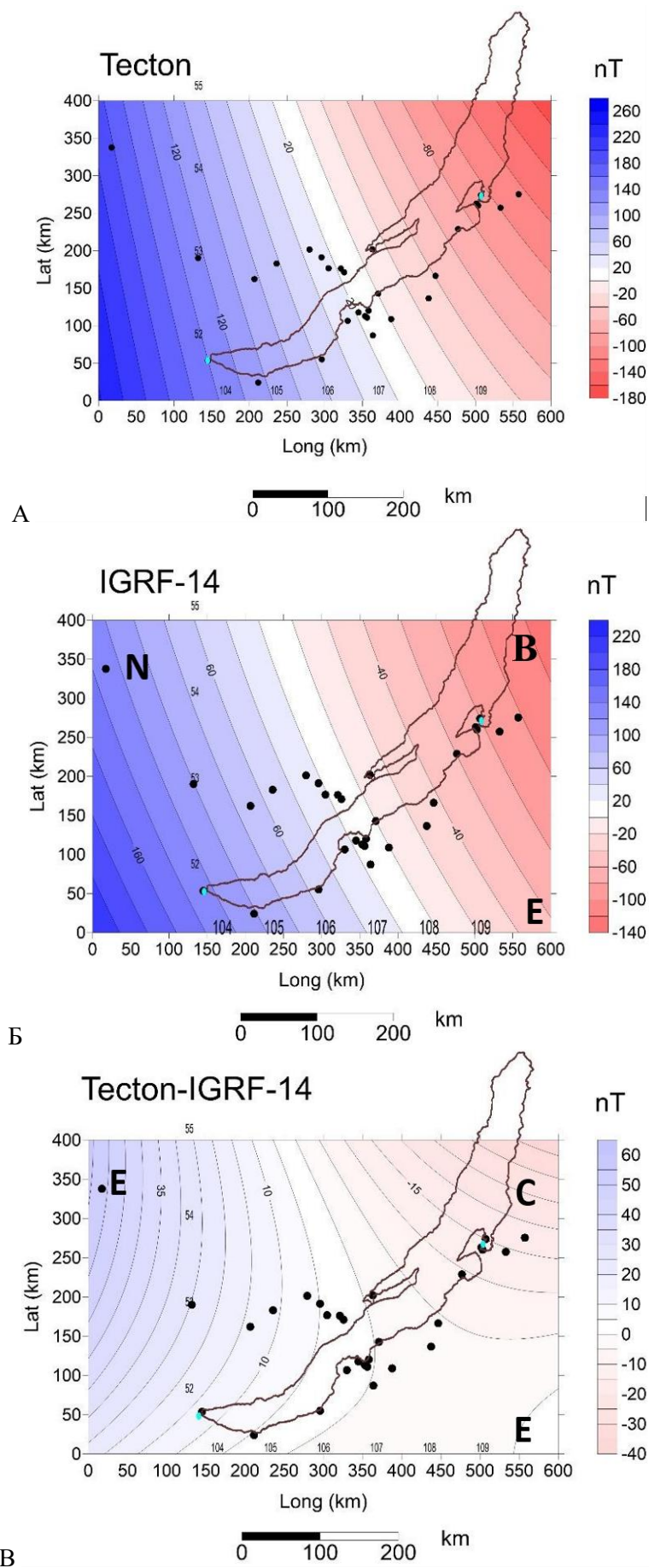


Рис. 2. Пространственное распределение изменений модуля вектора геомагнитной индукции за период 1997-2025 гг. на Байкальской сети: (А) – тектономагнитные данные; (Б) – IGRF-14; (В) – разность между (А) и (Б). Контур береговой линии озера Байкал показан темно-коричневой линией

Результаты. Учет векового хода для сети Алтая на основе экспериментальных данных выявил, что картина тектономагнитных аномалий включает максимум 3 нТл в центральной области участка, который попадает в зону деформации поверхности, вызванной Чуйским (Алтайским) землетрясением с $M_w = 7.3$ от 27 сентября 2003 г., и минимум 12 нТл к северу от зоны разрыва, параллельно последней (рис. 1).

Значение ВВ для Байкальского геодинамического полигона между крайними точками составило: (А) 260 нТл по тектономагнитным наблюдениям; (В) 225 нТл по модели IGRF-14; (С) 35 нТл – значение между минимальным и максимальным значениями разностей между (А) и (В) (рис. 2).

Обсуждение результатов. Исследования показывают, что модели IGRF, как и другие модели главного магнитного поля не всегда позволяют выделить вековую вариацию с требуемой точностью, поскольку не всегда учитывают с требуемой точностью локальные особенности главного магнитного поля. К тому же модели являются прогнозными и могут не учитывать быстрых изменений поля-джерков. Поэтому для локальных полигонов различие значений геомагнитного поля, определяемое по модели IGRF и по результатам измерений на конкретном полигоне, может быть значительным. Особенно это справедливо для районов Сибири, где сеть геомагнитных обсерваторий заметно реже, чем в европейской части России и, тем более, в Европе [Ладынин и др., 2006; Демина, Петрова, 2010; Кулешов, Дядьков, 2013].

Отметим, что необходимая степень полинома определяется из того условия, что величина нелинейности распределения поля ВВ ГМП высших порядков становится меньше требуемой точности. Это обусловлено тем, что стремление выбрать более высокие порядки полиномов по наблюдаемым данным приводит к возникновению локальных аномалий, поскольку в наблюдаемых данных может присутствовать вклад поля, соответствующий индуктивным и ориентационным эффектам, связанными как с намагниченностью горных пород, так и с неортогональностью векторов геомагнитного поля в пространстве. Также в данных может остаться небольшой вклад (от десятых до первых единиц нТл), связанный с неоднородностью солнечно-суточной вариации в пространстве.

Заключение. Различия параметров вековой вариации геомагнитного поля, определенные по данным наблюдений и по данным моделей главного магнитного поля IGRF-13/IGRF-14 может быть существенным для многих задач геомагнетизма, в частности, тектономагнетизма, где возникает задача выделения магнитных аномалий величиной первые единицы нТл, которые могут быть связаны с изменением геодинамического состояния земной коры региона. Поэтому использование реальных данных наблюдений при расчёте ВВ ГМП является актуальным.

Литература

1. Брагинский С.И. Геомагнитное динамо // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1978. №.9. С. 74–90.
2. Демина И.М., Королева Т.Ю., Фарафонова Ю.Г. Аномалии векового хода главного геомагнитного поля в рамках иерархической дипольной модели // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т.48. №.6. С. 849–858.
3. Демина И.М., Петрова А.А. Качество прогноза векового хода главного геомагнитного поля и его влияние на создание сводных карт аномального магнитного поля России // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. №.1. Вып.15. С. 206–215.
4. Кулешов Д.А., Дядьков П.Г. Проблемы и методы учета вековой вариации при проведении геомагнитных наблюдений и съемок в Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. 2013. С. 171–175.
5. Ладынин А.В., Попова А.А., Семаков Н.Н. Вековые вариации геомагнитного поля: сравнение спутниковых и наземных данных // Геология и геофизика. 2006. Т.47 (2). С. 278–291.
6. Alken P., Thébault E., Beggan C.D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // Earth Planets Space. 2021. Vol.73. 49 p.
7. Courtillot V., Mouël J.L.L. Time variations of the Earth's magnetic field: from daily to secular // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1988. Vol.16. P. 389–476.
8. Kuleshov D.A., Dyadkov P.G., Plotkin V.V. Correction for Geomagnetic Secular Variation Effects: A New Method (Case Study of the Altai Geodynamic Network) // Russian Geology and Geophysics. 2021. Т.62. №2. P. 255–262.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ МИКРОИМИДЖЕРОВ

Куприн Д. Ю.¹, Дубиня Н. В.^{1,2}

¹ – *Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; kuprin.daniil.geo@gmail.com*

² – *Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия*

Введение. Скважинные исследования являются одним из ключевых источников о свойствах и строении горных пород земной коры, также единственным источником о состоянии горных пород *in-situ*. Разработка месторождений в условиях сложной геологической обстановки требует более детальных исследований, нежели чем стандартный комплекс геофизических исследований скважин. В связи с этим, применяется расширенный комплекс исследований, часто включающий в себя методы, позволяющие измерить изменения физических характеристик горных пород в различных азимутальных направлениях, например, электрический скважинный имиджер позволяет получить развёртку электропроводности горных пород, слагающих исследуемую скважину.

Интерпретация результатов исследований электрических скважинных имиджеров заключается в ручном анализе растровых изображений стенок скважины, выделении и характеристике структурных элементов, одними из которых являются естественные трещины, представленные на скважинных имиджах синусоидальными структурами. Ручная интерпретация представляет собой достаточно сложную и трудоёмкую задачу, которая также сопряжена с риском ошибок – пропуска или некорректного выделения естественных трещин, что в дальнейшем может привести к построению некорректных геологических и геомеханических моделей.

В данном исследовании рассматривается подход, позволяющий автоматизировать процесс выделения и характеристики естественных трещин с помощью алгоритмов компьютерного зрения, кластеризации и методов статистического анализа, для получения геометрических параметров (глубины, угла и азимута падения) естественных трещин на скважинных имиджах.

Компьютерное зрение. Выделение естественных трещин производится посредством применения ансамбля алгоритмов компьютерного зрения, включающего в себя: бинаризацию методом Отцу [Otsu, 1979], бинаризацию методом треугольника [Young, et al., 2004], скелетонизацию [Ballard & Brown, 1982], выделение границ методом Кэнни [Canny, 1986], методом Шарра [Scharr, 2000] и методом Собеля [Sobel & Feldman, 1968]. Результатом работы этих алгоритмов являются бинарные маски участков скважинного имиджа, которые далее обрабатываются методом оптимизации Sequential Least Squares Processing [Kraft, 1988] (SLSQP) для решения задачи минимизации по трём параметрам (вертикальному смещению, амплитуда и фазе синусоиды). Результатом решения данной задачи являются синусоиды, отображающие вероятные геометрические параметры выделенной естественной трещины. Алгоритмы компьютерного зрения довольно «прямолинейны», в связи с чем необходима постобработка полученных синусоид, для исключения некорректных выделений (рис. 1).

Скважинный имидж обрабатывался представленным ансамблем алгоритмов компьютерного зрения в скользящем окне с заданным шагом. Такой подход позволил многократно выделить каждую естественную трещину, сформировав тем самым выборки геометрических параметров выделенных естественных трещин.

Для получения репрезентативного значения геометрических параметров использовался метод, основанный на распределениях Пирсона [Pearson, 1916]. Согласно данному подходу, строились гистограммы распределения геометрических параметров. Далее, рассчитывались моменты распределений необходимые для определения непрерывной аналитической функции плотности распределений значений геометрических параметров (рис. 2). Максимальные значения полученных функций отображают модальные значения, являющиеся наиболее репрезентативными средними значениями для обрабатываемых распределений геометрических параметров.

Модальные значения использовались для формирования результирующих синусоид, отображающих вероятные геометрические параметры выделенных естественных трещин на обрабатываемом участке скважинного имиджа (рис. 3).

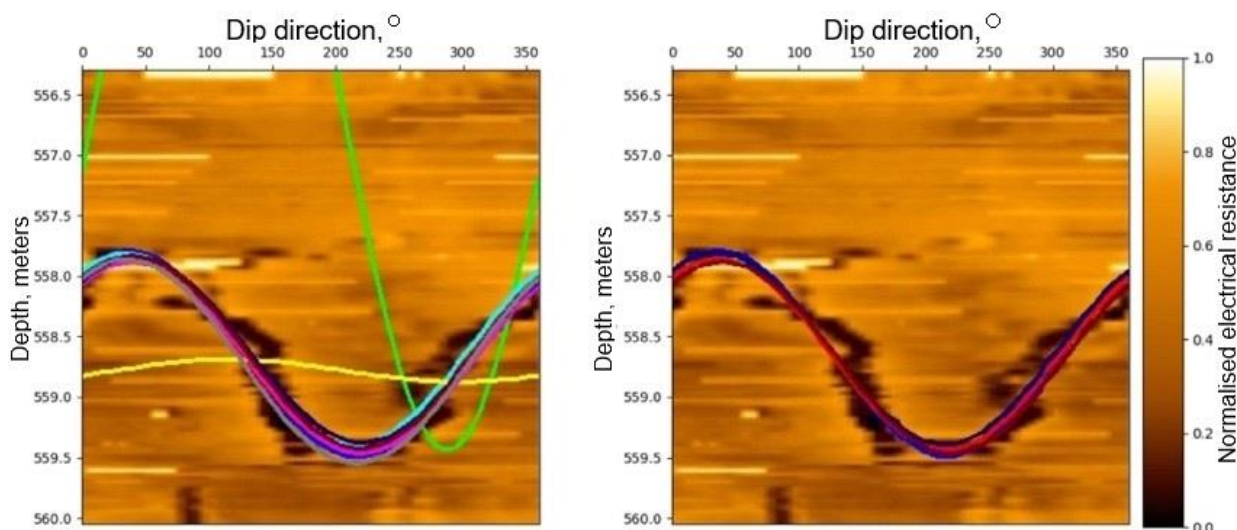


Рис. 1. Фильтрация результатов выделения естественной трещины на участке скважинного имиджа. Слева – синусоиды, полученные при обработке всех бинарных масок. Справа – синусоиды оставшиеся после процедуры постобработки

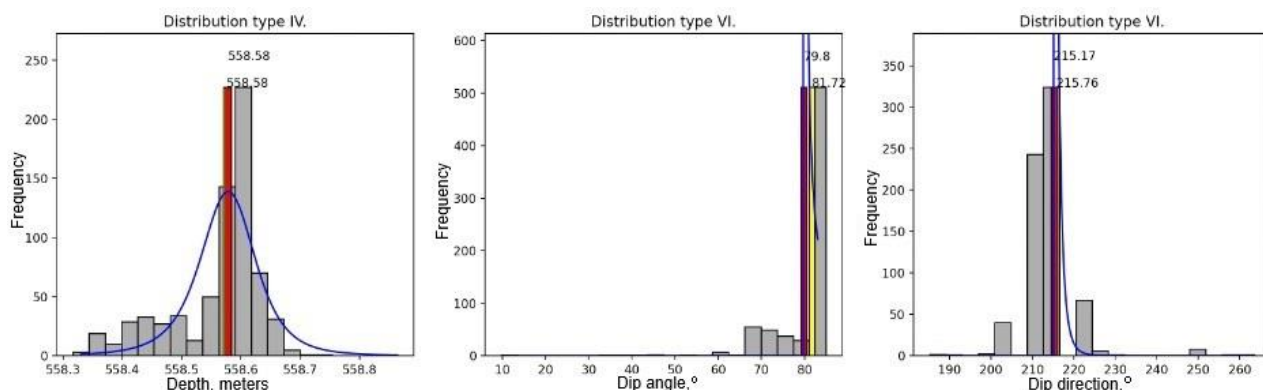


Рис. 2. Полученные распределения геометрических параметров. Синие кривые – аналитические функции плотности распределения, жёлтые столбцы – средние значения распределений, красные столбцы – модальные значения распределений

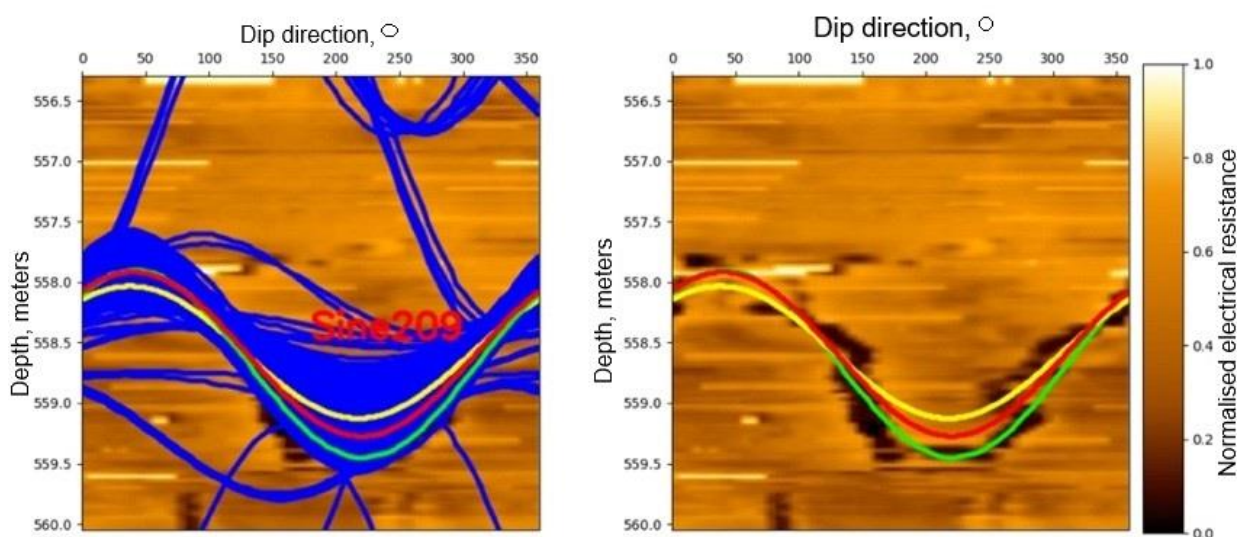


Рис. 3. Результат выделения и параметризации естественной трещины. Синие синусоиды – вся выборка геометрических параметров, зелёная синусоида – результат ручного выделения, жёлтая синусоиды – средние значения выборок, красная синусоида – модальные значения выборок

Результаты. Разработанный алгоритм использовался для выделения естественных трещин на электрическом скважинном имидже, полученном в ходе проведения исследовательского бурения в скважине C0001D, проведённого в рамках экспедиции №314 по программе Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Nankai Through Seismogenic Zone Experiment (NanTroSEIZE) Expedition 314[3] в регионе желоба Нанкай, расположенного к югу от о. Хонсю, Япония. Обработывался участок на глубине 500-600 метров. Для данного участка была проведена ручная интерпретация, для возможности проведения количественной оценки результатов работы алгоритма (таблица 1).

В ходе ручной интерпретации участка скважинного имиджа было выделено и характеризовано 13 естественных трещин. При обработке этого участка разработанным алгоритмом было выделено 24 вероятные естественные трещины, 2 из которых были задублированы. Среднее отклонение геометрических параметров для корректно выделенных естественных трещин составило: глубина – 20 см, угол падения – 9°, азимут падения – 35°.

Таблица 1. Результаты обработки участка скважинного имиджа

№ естественной трещины	Ручная интерпретация			Автоматическая интерпретация		
	Глубина, м	Угол падения,	Азимут падения, °	Глубина, м	Угол падения,	Азимут падения, °
1	502,15	68,30	181,20	502,16	65,31	141,60
				502,19	61,57	141,60
2	507,44	63,43	135,60	-	-	-
3	517,40	64,01	135,60	517,27	67,82	151,24
				517,20	66,09	149,85
4	519,34	65,57	0,00	-	-	-
5	520,87	68,70	318,00	521,46	82,17	312,89
	-	-	-	523,57	75,36	0,00
	-	-	-	525,97	72,64	0,00
	-	-	-	527,10	67,47	252,84
6	532,94	78,03	0,00	532,52	43,12	0,00
	-	-	-	535,70	81,26	56,40
	-	-	-	537,30	79,32	270,44
7	543,48	70,15	90,00	-	-	-
	-	-	-	546,38	73,57	279,21
8	551,88	64,57	102,00	551,44	52,05	56,40
9	558,65	81,06	216,00	558,58	79,80	215,17
	-	-	-	561,94	14,38	44,55
	-	-	-	562,55	50,65	68,80
	-	-	-	563,20	14,38	107,93
	-	-	-	563,70	84,80	33,25
10	568,85	35,68	0,00	568,91	45,73	207,08
11	581,69	41,09	153,60	-	-	-
	-	-	-	583,05	83,53	239,87
12	583,48	58,65	147,60	583,64	64,59	86,25
13	587,88	69,08	193,20	587,94	75,97	179,04
	-	-	-	597,46	58,16	0,00

Заключение. В ходе проведения исследования был разработан алгоритм, основанный на стандартных методах компьютерного зрения, позволивший выделить 9 из 13 естественных трещин на обработанном участке скважинного имиджа, а также, позволивший с достаточной точностью определить геометрические параметры выделенных трещин. Разработанный алгоритм статистической обработки позволяет в дальнейшем перейти к численной оценке достоверности результатов работы алгоритма выделения естественной трещин посредством расчёта доверительных интервалов вычисленных геометрических параметров.

Литература

1. *Ballard D. and Brown C.* Computer Vision. Prentice-Hall. 1982.
2. *Canny J.A* Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Nov. 1986. Vol.PAMI-8(6). P. 679–698.
3. *Kinoshita M., Tobin H., Ashi J., Kimura G., Lallement S., Sreaton E.J., Curewitz D., Masago H., Moe K.T.* Expedition 314/315/316 Scientists. Proceedings IODP, 314/315/316 // Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc; 2009.
4. *Kraft D.A.* Software Package for Sequential Quadratic Programming // Tech. Rep. DFVLR-FB, DLR German Aerospace Center — Institute for Flight Mechanics, Koln, Germany. 1988. Vol. 88(28).
5. *Otsu N.* A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1979. Vol.9(1). P. 62–66.
6. *Pearson K.* Mathematical contributions to the theory of evolution, XIX: Second supplement to a memoir on skew variation // Philosophical Transactions of the Royal Society 1916. Vol. 216. P. 538–548.
7. *Scharr H.* Optimal Operators in Digital Image Processing: Diss. ... Doktorwurde der Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultat. Heidelberg, 2000.
8. *Sobel I., Feldman G.* An Isotropic 3x3 Image Gradient Operator. [Presented at the Stanford Artificial Intelligence Project (SAIL) in 1968].
9. *Young I.T., Gerbrands J.J., van Vliet L.J.* Fundamentals of Image Processing. Online Book. 2004.

ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ФЛАНГА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ. РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ХОДЕ ЭКСПЕДИЦИИ РГО ПО МАРШРУТУ БАЙКАЛО-АМУРСКОЙ МАГИСТРАЛИ

Мануилова Е. А.¹, Тверитинова Т.Ю.^{1,2}

¹ – *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e.manuilova@ifz.ru*

² – *Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Введение. Результаты совместных исследований современного напряженного состояния коры Байкальской рифтовой системы (БРС), выполненные сотрудниками ИФЗ РАН г. Москва и ИЗК СО РАН г. Иркутск [Ребецкий, Добрынина, Саньков, 2022] в 2020-2024 гг., позволили провести тектонофизическое районирование активных разломов по уровню кулоновых напряжений, определяющих близость разломов к критическому состоянию [Ребецкий, Добрынина, Саньков, 2024]. В результате этих исследований было выделено три области в пределах БРС, для разломов на которых имелись участки высокого уровня кулоновых напряжений. Эти области могут рассматриваться как очаги возможных сильных землетрясений с магнитудой 6.5-7.0. Одна из таких областей находится в Севермуйской зоне, через которую проходит Байкало-Амурская магистраль (БАМ).

Поскольку для этой зоны характерны высокая сейсмичность и различные проявления неустойчивости горных пород, проявившиеся в процессе проходки Севермуйского тоннеля, то для нее необходимо уточнение локального напряженного состояния полевыми тектонофизическими методами, а также изучение структурных особенностей горных пород на основе геоморфологических методов.

В рамках комплексной научно-исследовательской экспедиции РГО по маршруту Байкало-Амурской магистрали от Института физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН приняли участие сотрудники лаборатории фундаментальных прикладных проблем тектонофизики снс Е.А. Мануилова и снс Т.Ю. Тверитина. Целью этих научных работ являлось изучение тектодинамических условий формирования разрывных структур и сейсмотектонических проявлений на опасных участках активных разломов в районе Севермуйской впадины и прилегающих территориях.

Материалы и методы исследования. В ходе полевых тектонофизических работ были проведены замеры трещиноватости, зеркал скольжения и других геологических индикаторов тектонических деформаций – обобщенное название всех геологических структур, прямо или косвенно указывающих на распределение действующих в момент их формирования напряжений. Выделяют три основных категории индикаторов по механизму их формирования [Ребецкий и др., 2017]:

1) разрывные нарушения сдвига (в механическом смысле слова) – разрывные нарушения с определенным в поле направлением относительного перемещения по ним: правые и левые сдвиги, сбросы, взбросы, надвиги, шарьяжи; зеркала скольжения с бороздами, штриховками и минеральными агрегатами, указывающими на вектор относительного перемещения их крыльев; сопряженные сколовые трещины;

2) разрывные нарушения, формирующиеся в обстановке растяжения/удлинения, ориентированного ортогонально к плоскости дизъюнктива (раздвиги, отрывы, минерализованные жилы, дайки магматических пород, кластические дайки);

3) разрывные нарушения, формирующиеся в обстановке сжатия/укорочения, ориентированного ортогонально к плоскости дизъюнктива (плоскости расщепления, кливажа, стилолитовые швы).

Полевые измерения позволяют собрать сведения о пространственной ориентировке геологических индикаторов тектонических напряжений, их относительном соотношении, минеральном выполнении, характерных амплитудах перемещений по ним, приуроченности к определенным тектоническим зонам, структурным этажам или структурно-вещественным комплексам.

Ниже представлена система записи данных по зеркалам скольжения и другим индикаторам тектонических напряжений [Ребецкий и др., 2017] в ходе полевых исследований. Замеры проводили геологическим компасом. Результаты замеров записывали в полевой дневник. Для фиксации изучаемых геологических объектов и процессов использовали фотоаппарат.

При этом подходе в точке замера были зафиксированы следующие пункты (по возможности): 1) общие данные для точки замеров (привязка точки, координаты, геологическое положение, состав и возраст пород в обнажении, элементы залегания и т.д.); 2) азимут простирания; 3) угол падения; 4) угол подвижки (скольжения); 5) размер зеркала скольжения или другого индикатора тектонического напряжения; 6) достоверность определения кинематического типа разрывного нарушения; 7) амплитуда нарушения (если возможно определить); 8) тип скульптуры на поверхности; 9) размер скульптурных знаков; 10) степень сохранности штриховки; 11) мощность зоны скольжения; 12) мощность тектонита или минерального выполнения.

Также в ходе полевых исследований была проведена эманационная съемка. Для этого использовали детектор-индикатор радона RADEX MR107 [Руководство по эксплуатации RADEX MR107], предназначенный для оценки эквивалентной равновесной объемной активности дочерних продуктов изотопов ^{222}Rn в воздухе по величине объемной активности радона. Значения активности радона интерпретируется в Бк/м³ по трём алгоритмам: пороговому, текущему и усреднённому. Дополнительно прибор фиксирует параметры окружающей среды – температуру, относительную влажность и давление.

Полученные полевые тектонофизические данные обрабатывали с помощью метода структурно-парагенетического анализа [Расцветаев, 1987] и метода катакластического анализа разрывных смещений [Ребецкий и др., 2017].

Результаты исследования. С 20 августа по 3 сентября 2025 года сотрудниками ИФЗ РАН проведены полевые тектонофизические исследования в рамках экспедиции РГО по маршруту БАМ. Работы удалось провести в пределах трех полигонов – Северобайкальский, Северомуйский и Чарский (рис. 1). Всего за это время пройдено 10 маршрутов – 45 точек наблюдения. В 33 точках наблюдения выполнены тектонофизические замеры (всего сделано 1418 замеров), в 10 точках наблюдения зафиксированы особенности строения четвертичных отложений, в 5 точках наблюдения отмечено местоположение некоторых гидрогеологических объектов. Важно подчеркнуть, что эти работы можно считать рекогносцировочными.

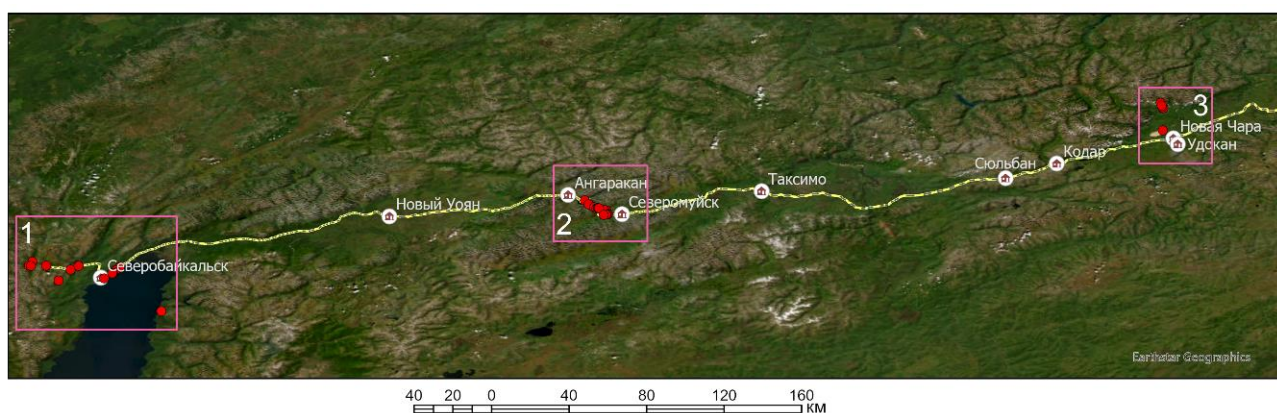


Рис. 1. Обзорная карта района работ. Красные кружки – точки наблюдения. Прямоугольные области – полигоны полевых исследований: 1 – Северобайкальский, 2 – Северомуйский, 3 – Чарский

Стоит отметить, что ранее на данной территории исследования по изучению особенностей дизъюнктивных структур региона и условиях их формирования проводились, в частности сотрудниками института земной коры (С.И. Шерман, К.Ж. Семинский, В.А. Саньков, О.В. Лунина и др.). Эти работы проводились различными геолого-геофизическими методами, в том числе и изучалась трещиноватость. Однако, специального изучения кинематической трещиноватости с массовыми замерами зеркал скольжения в разновозрастных комплексах пород сотрудниками ИЗК СО РАН в широком масштабе не проводилось. В связи с этим, полученные полевые данные, являются новыми для данного региона.

Северо-восточный фланг Байкальской рифтовой зоны представляет собой не типичный рифт, а сложную трансенсивную зону, сочетающую в себе деформацию растяжения и сдвига. Она представлена системой кулисообразно расположенных впадин, выполненных мощными четвертичными отложениями, которые разделены участками горных перемычек, в пределах которых развиты докембрийские и палеозойские метаморфические и интрузивные образования. Современная активность во впадинах выражена их прогибанием в условиях растяжения, связанного со сдвиговыми

перемещениями вдоль зоны в целом. Расположенные между впадинами горные перемычки также активны на современном этапе, но в отличие от впадин, происходящие здесь процессы характеризуются преобладанием сдвиговых смещений и даже формированием структур сжатия.

Проведенный анализ полевых тектонофизических данных и их обработка методом катакластического анализа позволили наметить наиболее опасные участки в пределах изученных объектов, которые: 1) приурочены к зонам разломов с высоким уровнем кулоновых напряжений, характеризуются активностью на современном тектоническом этапе развития, что подтверждается геоморфологическими наблюдениями; 2) расположены в узлах пересечения разломов разного простирания, характеризующихся сложной структурой и неустойчивым полем напряжения; 3) находятся в условиях горизонтального растяжения и сдвига, причем ось растяжения ориентирована поперечно железнодорожному полотну, тоннелю или другому объекту инфраструктуры; 4) связаны с комбинацией перечисленных признаков.

Участки, на которых присутствуют перечисленные признаки, можно рекомендовать для постоянного мониторинга (на обвалы, оползания и сходы лавин) и нуждаются в особых мероприятиях по укреплению объектов инфраструктуры.

В пределах Северобайкальского полигона выявлены два таких объекта. Первый расположен в районе западного портала Байкальского тоннеля (рис. 2). Этот объект расположен в узле пересечения Гуджекит-Кунерминского разлома субширотного простирания и Грамнинского разлома северо-северо-восточной ориентировки. В этой зоне происходят перемещения блоков горных пород по системе различно ориентированных трещин, к части которых приурочены выходы поверхностных вод. На этом участке уже проведены работы по защите дорожного полотна от лавин и обвалов.

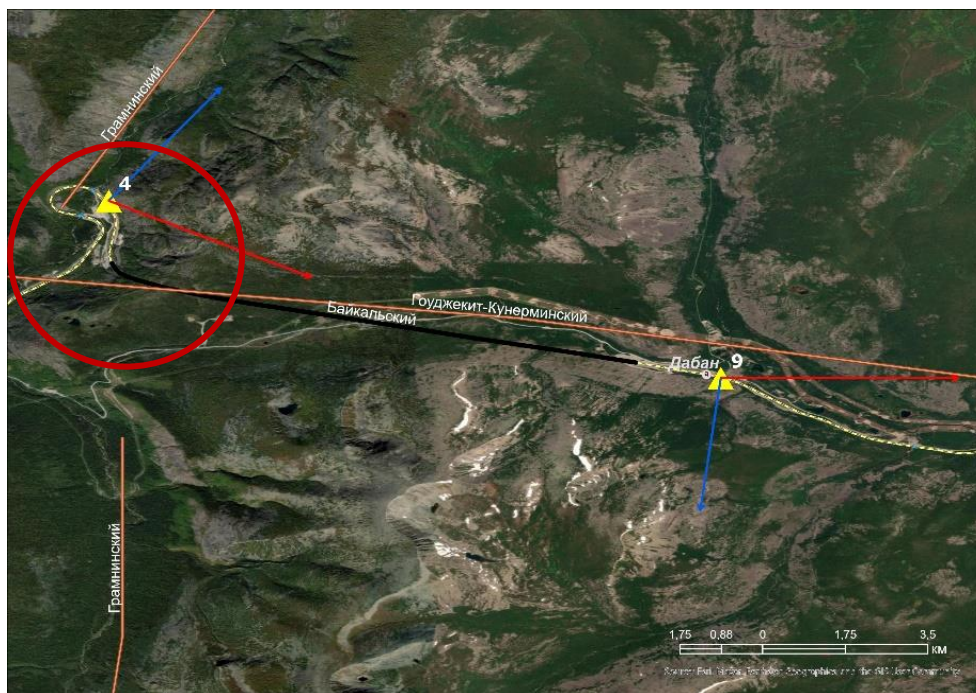


Рис. 2. Геодинамический тип напряженного состояния в пределах Байкальского тоннеля (желтый треугольник – горизонтальный сдвиг) и направление осей сжатия (красная стрелка) и растяжения (синяя стрелка). Красным овалом выделена наиболее тектонически активная область на обвалы и сход лавин

Второй объект приурочен к трассе БАМ, проходящей от Северобайкальска до Нижнеангарска, и идет по зоне Кичерского разлома на участке с повышенным уровнем кулоновых напряжений (рис. 3). Геоморфологические наблюдения показывают, что на этом участке расположены скальные выходы пород с интенсивным развитием трещиноватости, зон дробления. Северо-восточнее розового фрагмента Кичерский разлом показан зеленым цветом, т.е. далее идет участок с низким уровнем кулоновых напряжений. По геоморфологическим наблюдениям на этом участке склоны закрыты растительностью. Это наблюдение косвенно указывает на активность розового фрагмента Кичерского разлома. На розовом фрагменте разлома выявлено сочетание обстановки горизонтального сдвига и растяжения. При этом ось растяжения ориентирована поперечно к простиранию Кичерского разлома. В этом случае трещины, простирающиеся вдоль трассы, т.е. в северо-восточном направлении, могут инициировать разрушения породного массива и повреждения на железнодорожном полотне.

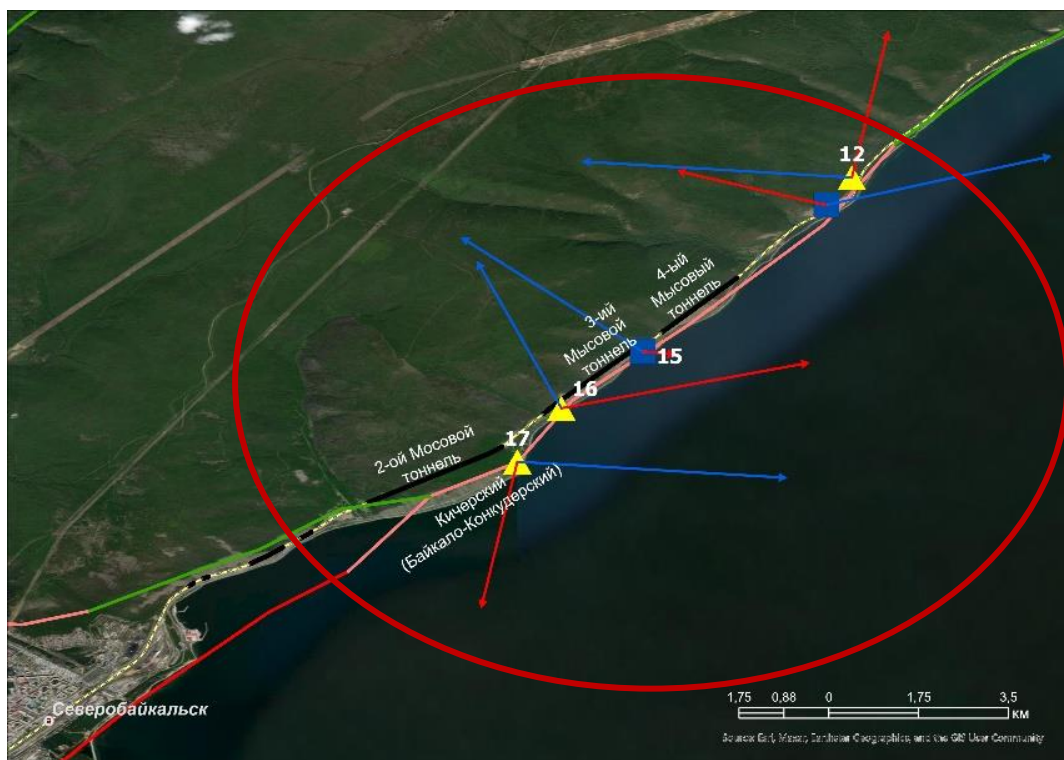


Рис. 3. Геодинамический тип напряженного состояния в пределах трассы Северобайкальск-Нижнеангарск (желтый треугольник – горизонтальный сдвиг, синий квадрат – горизонтальное растяжение) и направление осей сжатия (красная стрелка) и растяжения (синяя стрелка). Кичерский разлом показан фрагментами зеленого, розового и красного цветов, что соответствует низкому, повышенному и высокому уровню кулоновых напряжений. Красным овалом выделена наиболее тектонически активная область

В пределах Северомуйского полигона по проведенным исследованиям также можно выделить два тектонически активных объекта, которые можно рассматривать как участки возможных сильных землетрясений. Первый расположен в районе ж/д станции Горячий ключ (галерея №5) и Казанкан. Этот объект находится в зоне влияния Муяканского разлома восток-северо-восточного простирания. На рис. 4 он показан красным цветом, что соответствует высокому уровню кулоновых напряжений. По геоморфологическим наблюдениям на этом участке расположены многочисленные скальные выходы с развитой трещиноватостью, зонами дробления. Также на этом участке наблюдали системы тектонических трещин со сдвиговой и сбросовой составляющими в рыхлых четвертичных отложениях, что свидетельствует о современной активности зоны Муяканского разлома. Стоит отметить, что на этом участке зафиксированы меры по укреплению склонов. В районе ж/д станции Казанкан склон укреплен двумя металлическими сетками. В районе ж/д станции Горячий ключ железнодорожное полотно проходит по галерее над обнажающимся скальным выходом.

Наиболее опасным объектом, по полученным данным, является территория в районе восточного портала Северомуйского тоннеля (рис. 4). Он расположен на пересечении Итыкит-Амнудинского разлома восток-северо-восточного простирания с высоким уровнем кулоновых напряжений и Перевального разлома запад-северо-западной ориентировки. Стоит отметить, что здесь установлено сочетание обстановки горизонтального сдвига и растяжения. Обстановка растяжения подтверждается широким развитием структур отрыва в стенках штольни Северомуйского тоннеля, по которым сочится вода. Также в пределах этого объекта в штольне расположен термальный источник. Проведенные измерения объемной активности радона показали, что его содержание выше кларковых концентраций и составило (более 330 Бк/м³).

Таким образом тектонофизические исследования, проведенные по данным, полученным в ходе рекогносцировочного полевого сезона, с учетом активных тектонических зон, позволяют наметить участки, нуждающиеся в специальных мероприятиях по укреплению склонов и объектов инфраструктуры, местами совпадают с уже имеющимися укреплениями и мероприятиями.

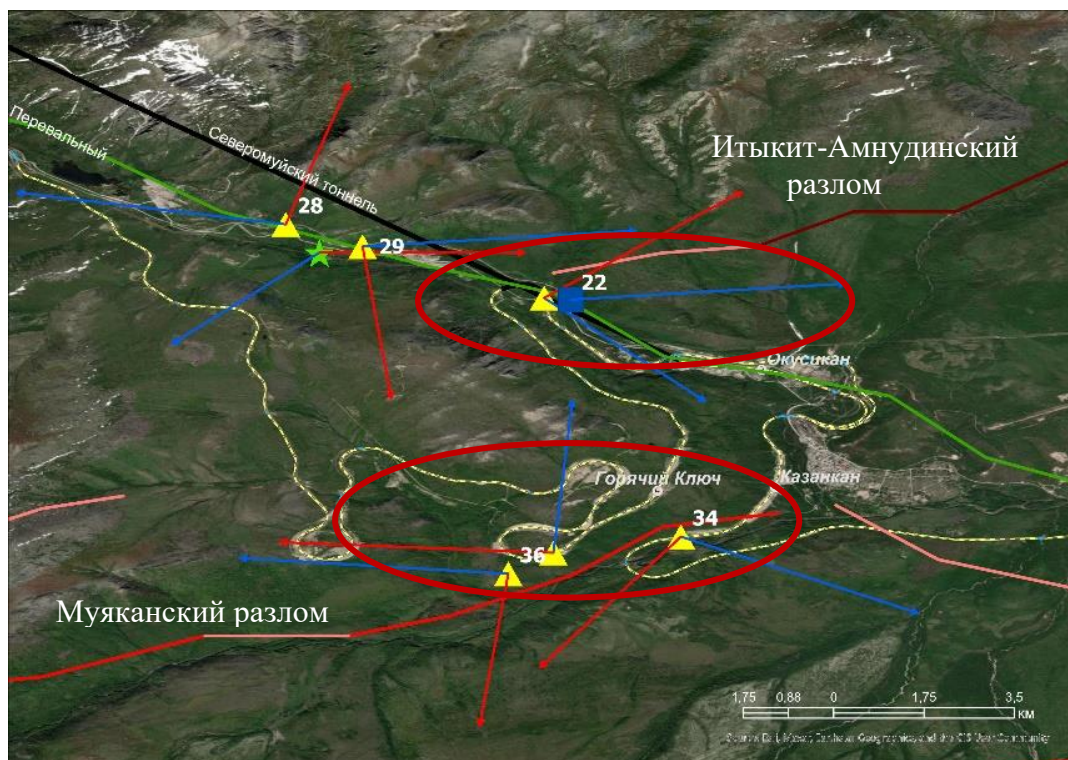


Рис. 4. Геодинамический тип напряженного состояния в пределах Северомуйского полигона (желтый треугольник – горизонтальный сдвиг, синий квадрат – горизонтальное растяжение, зеленая звезда – сдвиг в вертикальной плоскости) и направление осей сжатия (красная стрелка) и растяжения (синяя стрелка). Муяканский и Итыкит-Амнудинский разломы показаны красным и розовым цветом, что соответствует высокому и повышенному уровню кулоновых напряжений. Красным овалом выделена наиболее тектонически активная область

Выводы. Проведенные полевые геологические исследования в рамках экспедиции РГО по маршруту БАМ позволили подтвердить значительную нарушенность породных массивов в виде приоткрытых трещин, зон дробления, следов смещения на стенках трещин, обводненности и термальных источников особенно на участках разломов с высоким уровнем кулоновых напряжений.

Выявлены признаки наиболее опасных участков в пределах изученных объектов: 1) приурочены к зоне разлома с высоким уровнем кулоновых напряжений, характеризуются активностью на современном тектоническом этапе развития, что подтверждается геоморфологическими наблюдениями; 2) расположены в узлах пересечения разломов разного простирания, характеризующихся сложной структурой и неустойчивым полем напряжения; 3) находятся в условиях горизонтального растяжения и сдвига, при чем ось растяжения ориентирована перпендикулярно железнодорожному полотну, тоннелю или другому объекту инфраструктуры; 4) связаны с комбинацией перечисленных признаков.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. *Расцветаев Л.М.* Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. – М.: ГИН АН СССР. 1987. С. 173–235.
2. *Ребецкий Ю.Л., Добрынина А.А., Саньков В.А.* Напряженное состояние коры Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2022. Т.62. №8. С. 87–111.
3. *Ребецкий Ю.Л., Добрынина А.А., Саньков В.А.* Тектонофизическое районирование активных разломов байкальской рифтовой системы // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т.15(4). 0775.
4. *Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В.* От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. – М.: ГЕОС. 2017. 234 с.
5. Руководство по эксплуатации RADEX MR107. — URL: <https://www.quarta-rad.ru/catalog/dozimetr-radiometr-radon/datchik-radona-RADEX-MR107pl/>

ВЗАИМОСВЯЗЬ ФЛЮВИАЛЬНЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА И СОВРЕМЕННЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР ТАМАНСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Мануилова Е. А.¹

¹ – *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; e.manuilova@ifz.ru*

Введение. Современный облик рельефа Таманского полуострова низменный с холмистыми грядами, к которым местами приурочены грязевые вулканы. Несмотря на то, что на этой территории большое количество водных объектов (Азовское и Черное море, Керченский пролив, крупные лиманы), постоянные водотоки присутствуют лишь в восточной части района и представлены долинами рек Кубань и Гостагайка.

Таманский п-ов известен археологическими памятниками различных культур и эпох. Из сочинений древних авторов (в частности, из «Географии» Страбона) следует, что земли к востоку от Керченского пролива являлись архипелагом островов, разделенных морскими проливами или речными рукавами. В ходе Великой греческой колонизации (рубеж VII-VI вв. до н.э.), на берега архипелага прибыли греческие переселенцы и основали здесь свои поселения [Гарбузов, Завойкин, 2011]. Многочисленность этих поселений подразумевает наличие достаточного количества источников пресной воды. В настоящее время при изучении космических снимков видно, что даже около главных городов Азиатского Боспора (Фанагория, Гермонасса и др.) отсутствуют постоянные водотоки. Также в акватории Таманского залива выявлены участки затопленного культурного слоя [Никонов, 1998; Паромов, 2015]. Все эти исторические данные указывают на то, что ландшафт этой территории претерпел значительные изменения.

Некоторые исследователи [Keltenbaum et al., 2009; Fouache et al., 2011] занимались этой темой, однако, эти исследования основывались на одном факторе – изменении уровня моря. При этом территория Таманского п-ва – тектонически активный участок с проявлениями интенсивного грязевого вулканизма, разноамплитудных скоростей вертикальных движений от -2 до +12 мм/год [Юбко и др., 2016]. Таким образом, при обосновании палеогеографической реконструкции очертаний региона следует учитывать, как высоту уровня моря, так и тектонический фактор.

В связи с этим, целью этого исследования являлось выявление флювиальных форм рельефа и их сопоставление с тектоническими структурами для определения информативности в рамках палеогеографической реконструкции очертаний Азиатского Боспора.

Материалы и методы исследования. В ходе работы использованы спутниковые снимки Corona, SPOT и Landsat, материалы аэрофотосъемки, топографические карты, цифровая модель рельефа, построенная по радарным данным SRTM с разрешением 30 м, космические снимки с онлайн сервиса Landsat Explorer [<https://livingatlas2.arcgis.com/landsatexplorer>].

Для локализации гидросети выполнено визуальное дешифрирование имеющихся данных дистанционного зондирования (ДДЗ) с учетом морфологических и топографических особенностей региона. Дешифровочными признаками современных водотоков являются: затемнение тона изображения относительно общего фона на космических изображениях и материалах аэрофотосъемки; неправильная, линейно-извилистая или древовидная форма контуров; достижение водотоками местного базиса эрозии.

Основным дешифровочным признаком при локализации древних водотоков является изменение цвета изображения на более темные тона относительно фона на освоенных участках территории (распаханные поля, постройки и т.д.). Изменение фототона в этом случае объясняется особенностями разреза водотоков, который представлен легко проницаемыми породами-коллекторами грунтовых вод. Вода, скопившаяся в этих горизонтах, перекрытых проницаемыми породами, поднимается к поверхности за счет капиллярных сил, в результате чего участки почв, перекрывающих древние водотоки, имеют более темный тон на изображении. Таким образом, обводненные участки почв, также соответствуют контурам древних водотоков [Петрусевич, 1961]. Эти участки хорошо прослеживаются на космических снимках с фильтром Agriculture, где синие и темно-синие тона соответствуют обводненным участкам почв. Стоит отметить, что тальвеги древних водотоков не доходят до местного базиса эрозии – они резко обрываются или переходят в современные водотоки.

Для построения карт локализации, выделенных водотоков выполнена статистическая обработка полученных данных при помощи ГИС-технологий. Для корректного расчета плотности водотоков была построена сетка. Размер ячейки составил 300 x 300 м, который выбран с учетом средней длины всех водотоков района исследования. Для каждой ячейки рассчитан коэффициент плотности водотоков, который равен отношению суммы длин всех водотоков в ячейке на площадь ячейки. Значение, полученного коэффициента, относилось к центру ячейки. Интерполяция значений по площади проводилась методом «Естественная окрестность».

Выявление новейших тектонических структур выполнено структурно-геоморфологическим анализом Н.П. Костенко. Полная методика исследования представлена в следующих материалах [Костенко, 1999]. Для верификации результатов камеральных наблюдений и построения карты типов берегов летом 2022 г. выполнены полевые геоморфологические исследования.

Помимо этого, для подтверждения результатов дешифрирования разрывных нарушений, проведена эманационная съемка с помощью детекторов-индикаторов радона Radex MR-107. Приборы устанавливались в крест простирания разрывной зоны. При этом пройдено 3 профиля. Заложение профилей съемки основано на геоморфологических наблюдениях: оползневые процессы в береговой линии (на фоне «ровной» стенки) и понижения перед дорогой. Расстояние между точками измерения (в пределах одного профиля) составило ~3 м. Прибор размещали на глубине 0.5-0.7 м. Время измерения – 12-14 ч.

Результаты исследования. В результате составлены схемы современной и древней гидросети Таманского полуострова [Мануилова и др., 2023]. Современные водотоки представлены двумя типами – постоянным и временным. Постоянные водотоки – реки, расположенные в восточной части региона, берущие свое начало в Кавказских горах. Временные водотоки представлены следующими генетическими типами: эрозионные борозды, промоины, балки и «висячие» долины. Эти флювиальные формы рельефа сформировались в основном за счет дождевого питания, выхода грунтовых вод на поверхность и таяния сезонных снегов.

Эрозионные борозды и промоины приурочены к холмистым грядам, некоторые из них заканчиваются у подошвы гряд. Эти водотоки образуют древовидный, перистый и местами решетчатый рисунок. Эти же формы рельефа отмечены на склонах конусовидных грязевых вулканов, образующие радиально расходящийся (центробежный) рисунок от вершины грязевого вулкана к его подошве. Промоины отмечаются вдоль береговой линии (м. Каменный, Кизилташский и Ахтанизовский лиманы). Кроме того, они приурочены к участкам проявления оползневых процессов – юго-восточной части Курчанской гряды, гряда Разнокол, южная и юго-восточная части Старотитаровской гряды.

При слиянии некоторых эрозионных борозд и промоин, образуются балки. Для них характерен в основном одиночный четко выраженный тальвег. Местами к ним примыкают тальвеги древних водотоков. Исходя из этого, некоторые современные балки могут быть унаследованными, т.е. развиваться на месте древних водотоков. К этому типу водотоков также можно отнести «висячие» долины. Они отмечены на южном склоне Курчанской гряды, на северном склоне гряды Разнокол, на северо-восточном склоне Бугазской гряды. Также единичные «висячие» долины отмечены вдоль береговой линии – вблизи подножия г. Горелая и, местами, от оз. Тузла до оз. Соленое. Их образование связано или с резким тектоническим подъемом участка, или с процессом, при котором разрушение берега происходит интенсивнее, чем водоток успевает достигать местного базиса эрозии.

На схеме палеогидросети показаны древние водотоки, не выраженные в современном рельефе в результате антропогенной деятельности, а также современные унаследованные водотоки. Их формирование, вероятно, происходило в условиях более влажного климата [Bolikhovskaya et al., 2018], чем образование современных водотоков. На схеме выделены два объекта: «северный пролив» и «южный пролив», их генезис стал темой продолжительной научной дискуссии [Гарбузов, 2016]. Проанализировав космические снимки Landsat Explorer с фильтром Agriculture, намечена граница обводненного контура проливов. Эти данные подтверждены геоморфологическими наблюдениями, в ходе которых в пределах контуров на поверхности зафиксирована вода или выявлены постоянно сильно увлажненные участки почв. В результате исследований определены точки, бурение серии скважин в которых позволит сделать окончательные выводы о существовании и генезисе этих проливов.

При сопоставлении схемы палеогидросети с картой плотности поселений [Гарбузов, Завойкин, 2011] отмечается их корреляция. К участкам с высокой плотностью поселений (более 0.05 поселений на км²) приурочен максимум древних водотоков. Они могли служить источником пресной воды для этих поселений.

Результаты сопоставления современных и унаследованных флювиальных форм рельефа с тектоническими структурами представлено на рис. 1 и в таблице 1.

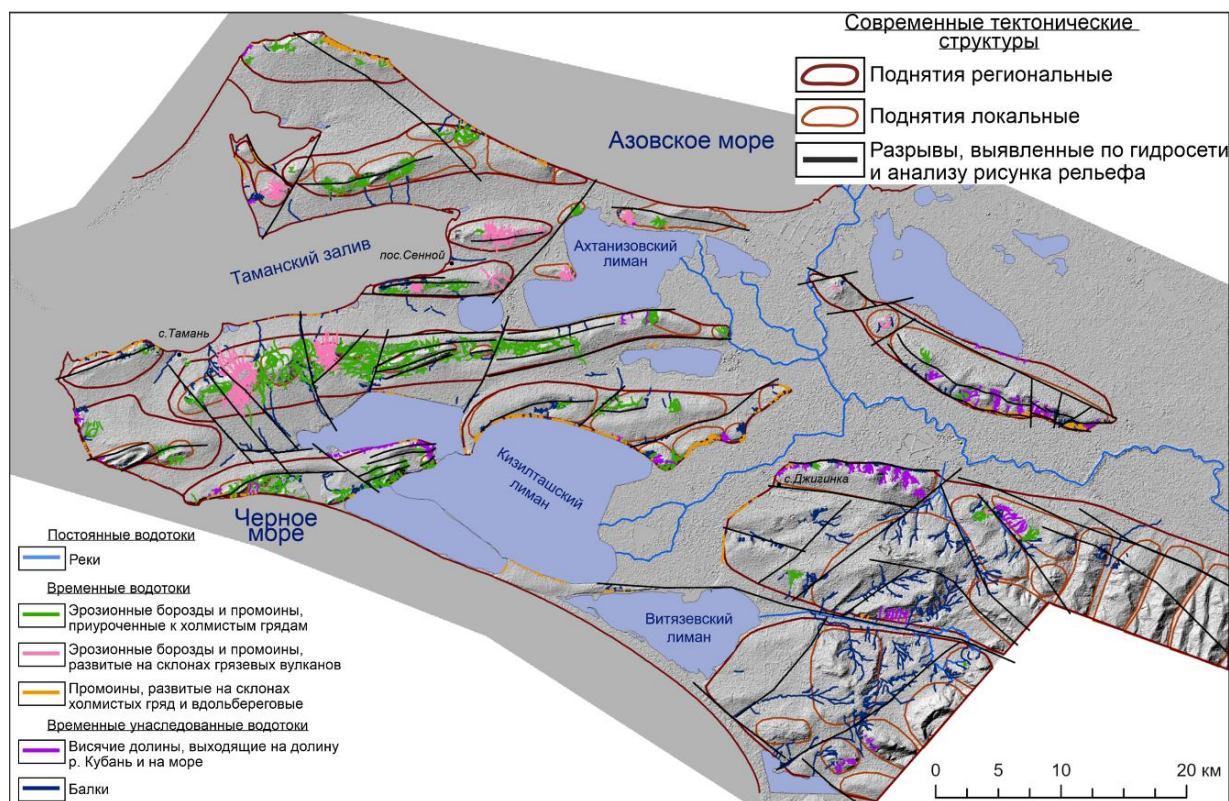


Рис. 1. Схема сопоставления флювиальных форм рельефа с современными тектоническими структурами

Таблица 1. Приуроченность современных флювиальных форм рельефа к новейшим тектоническим структурам

Флювиальная форма рельефа	Приуроченность к тектонической структуре
Эрозионные борозды и промоины, приуроченные к холмистым грядам	Локальные впадины, разделяющие локальные поднятия в пределах региональных структур и их оконтуривание, новейшие разрывы
Эрозионные борозды и промоины, развитые на склонах грязевых вулканов	Локальные поднятия в пределах положительных и отрицательных региональных структур
Промоины, развитые на склонах холмистых гряд и вдольбереговые	Оползневые склоны региональных поднятий
Балки (их вершины)	Области перехода от региональных поднятий к впадинам

На одном из выявленных разрывных нарушений возле городища Фанагория проведены замеры эманиции радона в подпочвенном слое. Фоновая замеренная концентрация радона составила $<30\text{Бк}/\text{м}^3$. В зоне разрывного нарушения она достигла $600\text{Бк}/\text{м}^3$, что является выше нормы. Эти данные позволили подтвердить наличие разрывного нарушения, а также уточнить его местоположение.

При анализе карт локализации современных, древних и унаследованных водотоков и схемы сопоставления флювиальных форм рельефа с современными тектоническими структурами выделены четыре области, отличающиеся густотой водотоков, их распределением и направлением стока (рис. 2). Первая область расположена в северо-северо-западной части полуострова. Здесь древние водотоки равномерно распределены по площади, а их густота значительно преобладает над современными. Направление стока древних водотоков в основном направлено к Динскому заливу, а современных – к Таманскому заливу. Возможно, это свидетельствует о тектонической перестройке в этой части полуострова. Вторая область – западно-центральная, где наибольшая концентрация

современных водотоков приурочена к склонам холмистых гряд и грязевым вулканам, что указывает на современную тектоническую активность этих участков. Древние водотоки, в том числе и унаследованные, равномерно распределены по этой территории. Направление стока для этих водотоков сонаправлено.

Таким образом, в этой области направление стока в течение последних 2500 лет существенно не изменилось. Третья область расположена на севере и северо-востоке полуострова. Здесь развиты в основном древние и унаследованные водотоки, среди которых преобладают «висячие» долины. Водотоки располагаются в основном на южном и юго-западном склоне Курчанской гряды, на правом берегу р. Кубань. Левый берег р. Кубань относится к четвертой (юго-восточной) области, здесь также присутствуют «висячие» долины, что может свидетельствовать об одновременном тектоническом поднятии блоков с долинами этого типа.

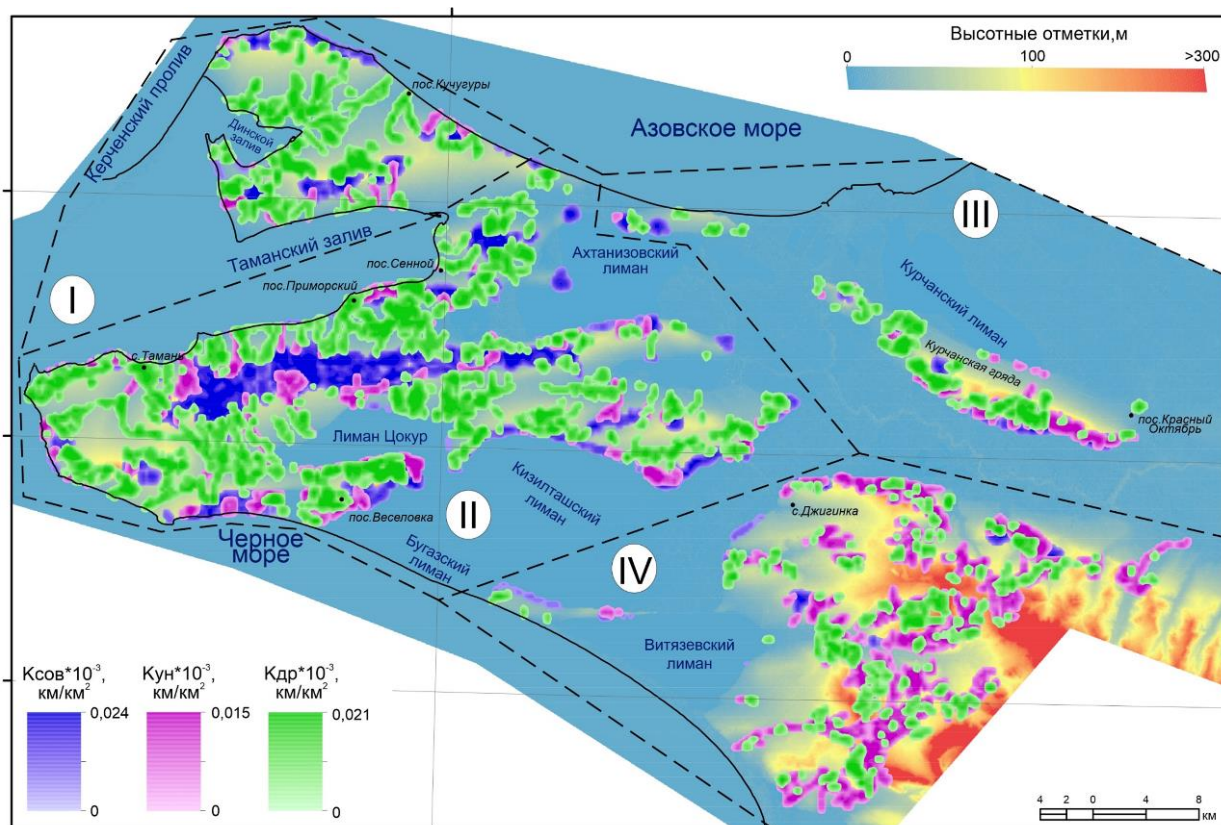


Рис. 2. Четыре тектонических области на территории Таманского полуострова, выявленные по анализу распределения густоты древних, унаследованных и современных водотоков, а также схемы их сопоставления с современными тектоническими структурами

Заключение. В рамках разработки палеогеографической реконструкции очертаний Таманского полуострова на основе проведенных исследований впервые локализована сеть древних водотоков, обоснована гипотеза о нахождении «северного» и «южного» проливов на основе контура обводненности, определены точки бурения проверочных скважин. Сопоставление локализации древних водотоков с картой плотности поселений (по Я.М. Паромову) позволило установить их корреляцию с участками высокой плотности поселений. Древние водотоки могли служить источником пресной воды для греческих переселенцев. Показана сеть современных водотоков, установлен их генезис и выявлена приуроченность к тектоническим структурам. Часть современных водотоков позволяет выявить новейшие разрывы, что очень важно для данной территории, так она сложена легкоразмываемыми породами. Проведенная съемка эманацій радона подтвердила и уточнила положение разрывного нарушения возле городища Фанагория. Выделены четыре области, различающиеся густотой водотоков, распределением и направлением их стока. Установлено, что в границах первой области в последние 2500 лет изменилось направление стока, что может быть объяснено воздействием тектонических процессов.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. *Гарбузов Г.П.* «Страбонов» рукав Кубани и хора Фанагории // Фанагория. Результаты археологических исследований. Материалы по археологии и истории Фанагории. М.: ИА РАН. 2016. Т.4. С. 34–45.
2. *Гарбузов Г.П., Завойкин А.А.* Освоение греками земель Таманского полуострова в последней четверти VI- первой половине V в. до нашей эры. Текст приводится по изданию: «Античный мир и археология». Саратов. 2011. Вып.15. С. 194–222.
3. *Костенко Н.П.* Геоморфология. М.: МГУ. 1999. 379 с.
4. *Мануилова Е.А., Хотылев О.В., Ольховский С.В., Хотылев А.О., Майоров А.А., Щенелев Ф.С.* Палеоидросеть Таманского полуострова по материалам дистанционного зондирования // Краткие сообщения Института археологии. 2023. №272. С. 457–472.
5. *Никонов А.А.* Затопленные остатки античных сооружений по берегам Боспора Киммерийского (в связи с проблемой изменения уровня моря) // Российская археология. 1998. №3. С. 57–66.
6. *Паромов Я.М.* Краеугольный камень Таманской палеогеографии // Краткие сообщения Института археологии. 2015. №241. С. 137–153.
7. *Петрусевич М.Н.* Аэрометоды при геологических исследованиях. Изд-во: Главное управление геодезии и картографии Мин. геол. и охраны недр СССР. 1961. 407 с.
8. Сервис Landsat Explorer. URL: <https://livingatlas2.arcgis.com/landsatexplorer>
9. *Юбка В.М., Глазырин Е.А., Шестопалов В.Л.* Опыт измерения современных движений земной коры в районе Азово-Черноморского побережья РФ // Тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. М.: ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН. 2016. С. 298–303.
10. *Bolikhovskaya N.S., Porotov V., Faustov S.S., Korotaev V.N., Richards K., Kaitamba M.D.* Detailed reconstructions of holocene climate and environmental changes in the Taman Peninsula (Kuban River delta region) and their correlation with rapid sea-level fluctuations of the black sea // Quaternary International. 2018. Vol.465. No.Part A. P. 22–36.
11. *Fouache E., Kelterbaum D., Brückner H., Lericolais G., Porotov A., Dikarev V.* The Late Holocene evolution of the Black Sea e a critical view on the so-called Phanagorian regression // Quaternary International. 2011. P. 1–13.
12. *Keltenbaum D., Bruckner H., Porotov A., Schlotzhauer U., Zhuravlev D.* Sea-level changes in the Black Sea and their impact on the palaeogeography of the Taman Peninsula (SW Russia) during the Greek colonization of the 1st millenium BC // IGCP 521. 2009. 96 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ ТЕЛ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ. НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОРЫ КОЛЬСКОГО РЕГИОНА

Мягков Д. С.¹

¹ – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; dsm@ifz.ru

В исследовании представлены численные геодинамические модели нагружения Земной коры при формировании интрузивных тел различной геометрии. Показан механизм возникновения аномального нагружения земной коры при проникновении и формировании интрузий, показаны разнообразные модели для протяжённых интрузий типа дайки и изометричных (лакколит, шток, вторичный очаг). Основной целью исследования является моделирование влияния крупных магматических тел, включая транскоровые интрузии и магматические пояса в целом. Показана зона влияния интрузии на тип напряжённого состояния коры, находящейся изначально в литостатическом напряжённом состоянии. Рассматривается вопрос о происхождении аномальных напряжений горизонтального сжатия Кольского региона, создана численная модель нагружения коры при формировании Хибинского и Ловозёрского интрузивов.

Для численного расчёта применялась явная конечно-разностная схема, разработанная Уилкинсом для исследования упруго-пластических тел [Уилкинс, 1967] и усовершенствованная Стефановым [Стефанов, 2005] для применения в геомеханике. Тела модели рассматриваются как упругопластические. В отличие от классического подхода Уилкинса, в данном подходе берётся более сложная и подходящая для геосреды модифицированная модель Друккера-Прагера-Николаевского [Николаевский, 1972]. Модели на рис. 1 состоят из идентичных ячеек размером 500 x 500 м, общее количество ячеек составляет 300000-600000. Тела модели рассматривались как упрочняющиеся упруго-пластические с законом пластического течения Друккера-Прагера-Николаевского для коры и Мизеса для мантии [Николаевский, 1972]. Для коровой части помимо параметров, указанных в таблице 1, введен параметр «коэффициент дилатансии», равный 0.3 [Николаевский, 1972].

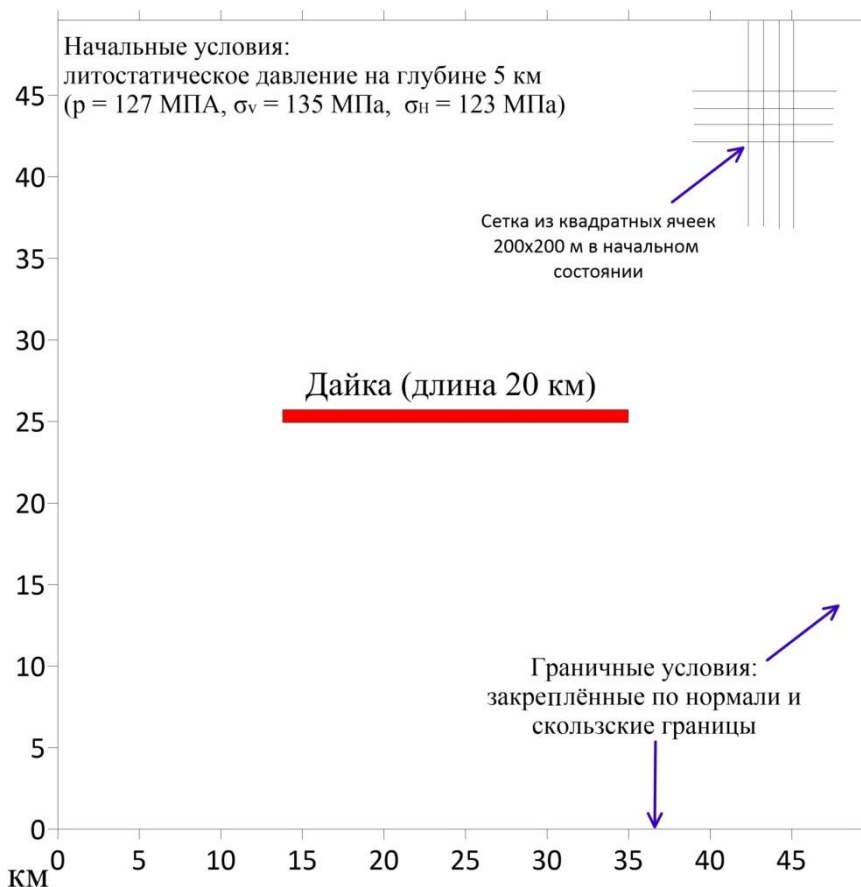


Рис. 1. Общая схема модели с дайкой в плане конечной длины. На рисунке представлен вариант граничных условий, используемый в дальнейших расчётах, соответствующий глубине 5 км

В исследовании представлены 2 базовые модели – дайки и изометричной интрузии. Схема модели с дайкой представлена на рис. 1. рассматривается модель крупной одиночной интрузии с геометрией типа дайки (интрузия по магмопроводящему разлому). Целью исследования является изучение уровня аномальных напряжений в области формирования интрузивного тела, в первую очередь – дополнительного горизонтального сжатия, создаваемого боковыми поверхностями дайки. Задача считается в двумерной постановке, модель строится в плане (рис. 1). При этом тип напряжённого состояния – плоская деформация.

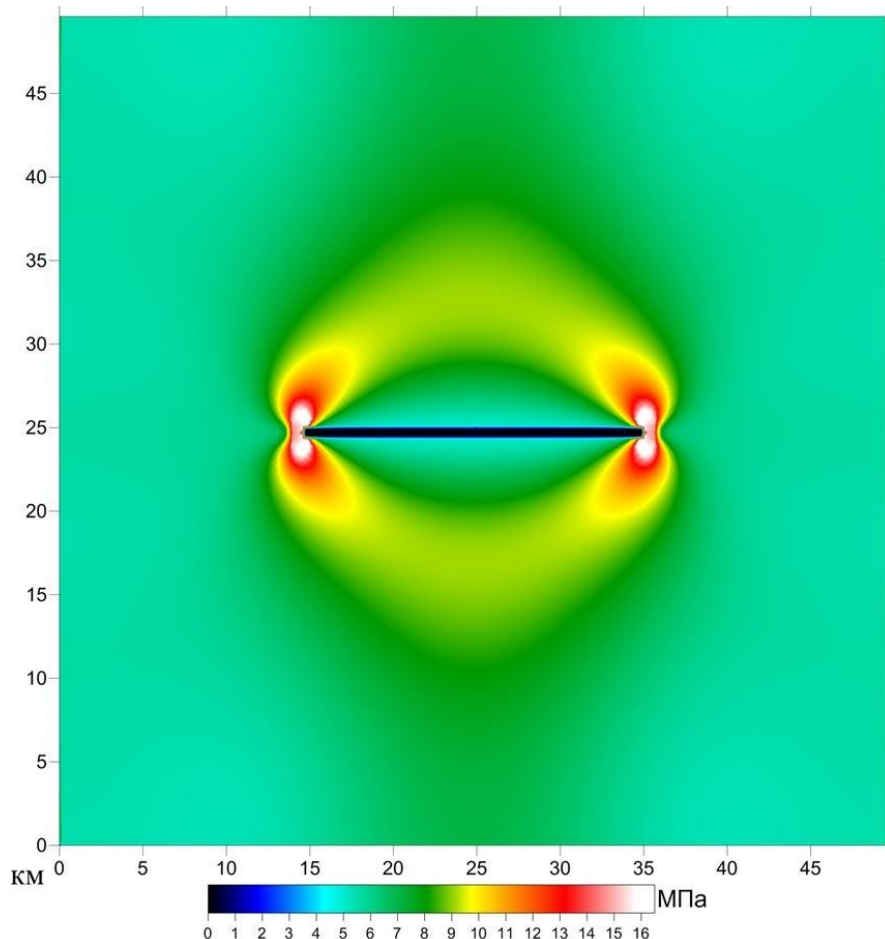


Рис. 2. Поле максимального касательного напряжения в модели с дайкой (глубина 5 км)

Начальные напряжения подобраны для усреднённой континентальной коры и глубины 5 км. Уровень литостатического давления равен 127 МПа, нормальные горизонтальные напряжения составляют 123 МПа – 0.91 % от вертикальных (135 МПа), что соответствует допущению о том, что среда находится в закритическом состоянии (за счёт псевдопластичности). Давление магмы равно 147 МПа, $\rho_m = 1.16 \rho_l$, где ρ_l – литостатическое давление. Флюид фактор непосредственно в модель не вводится, но коэффициент угла внутреннего трения α эффективно занижен до значения 0.05 для учёта влияния флюида.

Результаты моделирования (для второго инварианта тензора напряжений) представлены на рис. 2. Можно видеть, что произошла генерация весьма высокого для глубины 5 км уровня касательных напряжений, более 16 МПа близ концевых участков дайки. Зона же активного влияния дайки с уровнем касательных напряжений 8-10 МПа (при фоновом уровне около 6 МПа простирается на 25 км от плоскости дайки и достигает краёв модели. Более подробно задача о нагружении коры при формировании крупной дайки представлена в статье [Мягков, 2025]. В частности, там показано, что в зависимости от длины дайки сильно меняется ширина зоны влияния, причём при росте длины дайки (при прочих равных условиях) вокруг дайки в большей степени формируется область с типом напряжённого состояния «горизонтальное сжатие», тогда как в обратном случае – «горизонтальный сдвиг».

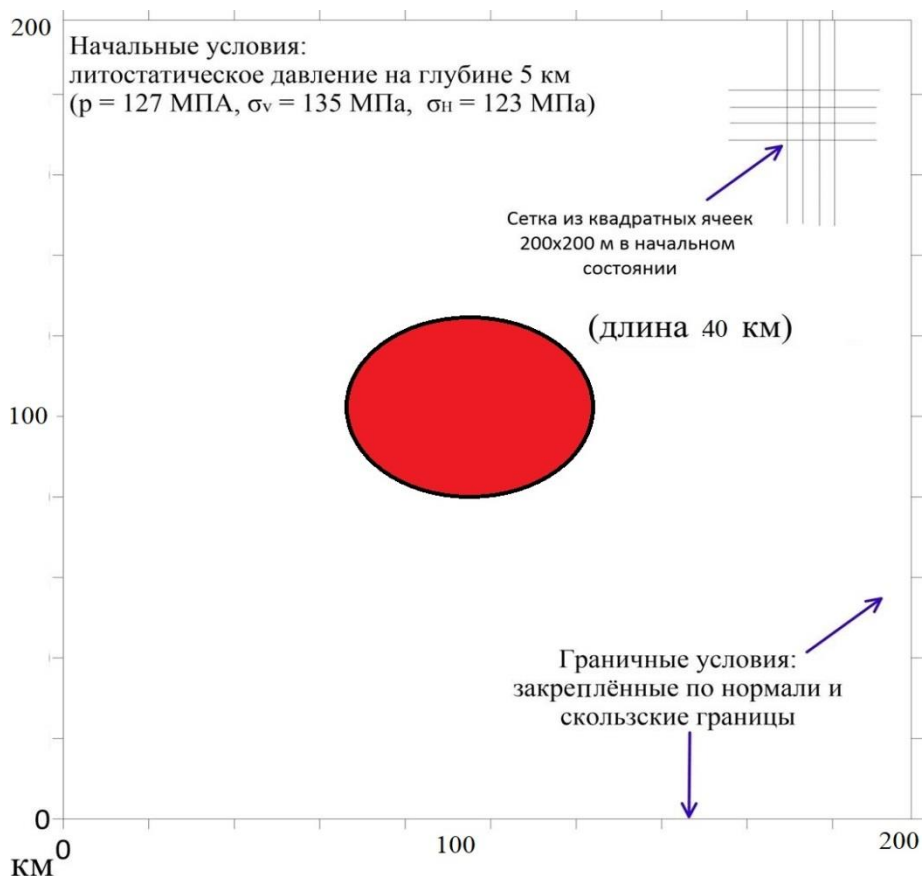


Рис. 3. Общая схема модели с изометричной интрузией в плане. На рисунке представлен вариант граничных условий, используемый в дальнейших расчётах, соответствующий глубине 5 км

Вторая модель, представленная в работе – модель нагружения земной коры при формировании изометричной интрузии (лакколит, шток, вторичный очаг). Данная модель с изометричной интрузией рассматривается в приложении к проблеме формирования напряжённо-деформированного состояния Хибинского массива. Схема модели представлена на рис. 3. Она сходна с предыдущей и имеет такие же этапы нагрузки, однако область плавления в модели ограничена эллипсом с большой осью равной 40 км, что соответствует размеру Хибинского массива в широтном направлении. При формировании изометричной интрузии такого размера зона влияния составляет 60-80 км, где уровень аномальных напряжений заметен на фоне литостатики. При давлении магмы 147 МПа (что соответствует глубине очага 40 км при условии, что давление в очаге определяется литостатикой) повышенный уровень давления в 130 МПа наблюдается даже близ краёв модели на расстоянии 80 км от интрузии (и 100 км от центра интрузии). Поле максимальных касательных напряжений представлено на рис. 4. В самой интрузии касательные напряжения считаются равными нулю, т.к. на последнем этапе расчёта её ячейки находятся в расплавленном состоянии (процесс последующего остывания в данной работе не рассматривается). Касательные напряжения на расстоянии до 20 км от края интрузии находятся в диапазоне 14-17 МПа, что соответствует по уровню тектоническим напряжениям в регионах, где их уровень повышен. Также полученные значения соответствуют по уровню данным in-situ из Хибинского массива. Отдельно рассмотрим вопрос о распределении геодинамического типа напряжённого состояния, генерируемого подобной интрузией. Значительная область вокруг интрузии перешла в состояния типа «горизонтальный сдвиг». Данная область шириной около 40-45 км от края интрузии. Формирование сдвиговой обстановки связано с тем, что уровня избыточных горизонтальных напряжений хватает для того, чтобы наибольшее горизонтальное напряжение превышало литостатическое вертикальное, однако наименьшее горизонтальное напряжение становится меньше по амплитуде вертикального на сравнительно небольшом удалении от интрузии, что и определяет формирование сдвиговой обстановки. такая ситуация вызвана именно изометричностью интрузии, при росте линейного размера хотя бы в одном направлении, при сохранении размеров в перпендикулярном, достаточно быстро начала формироваться протяжённая зона горизонтального сжатия, что хорошо показано для модели с дайкой (и подробно рассмотрено в работе [Мягков, 2025]).

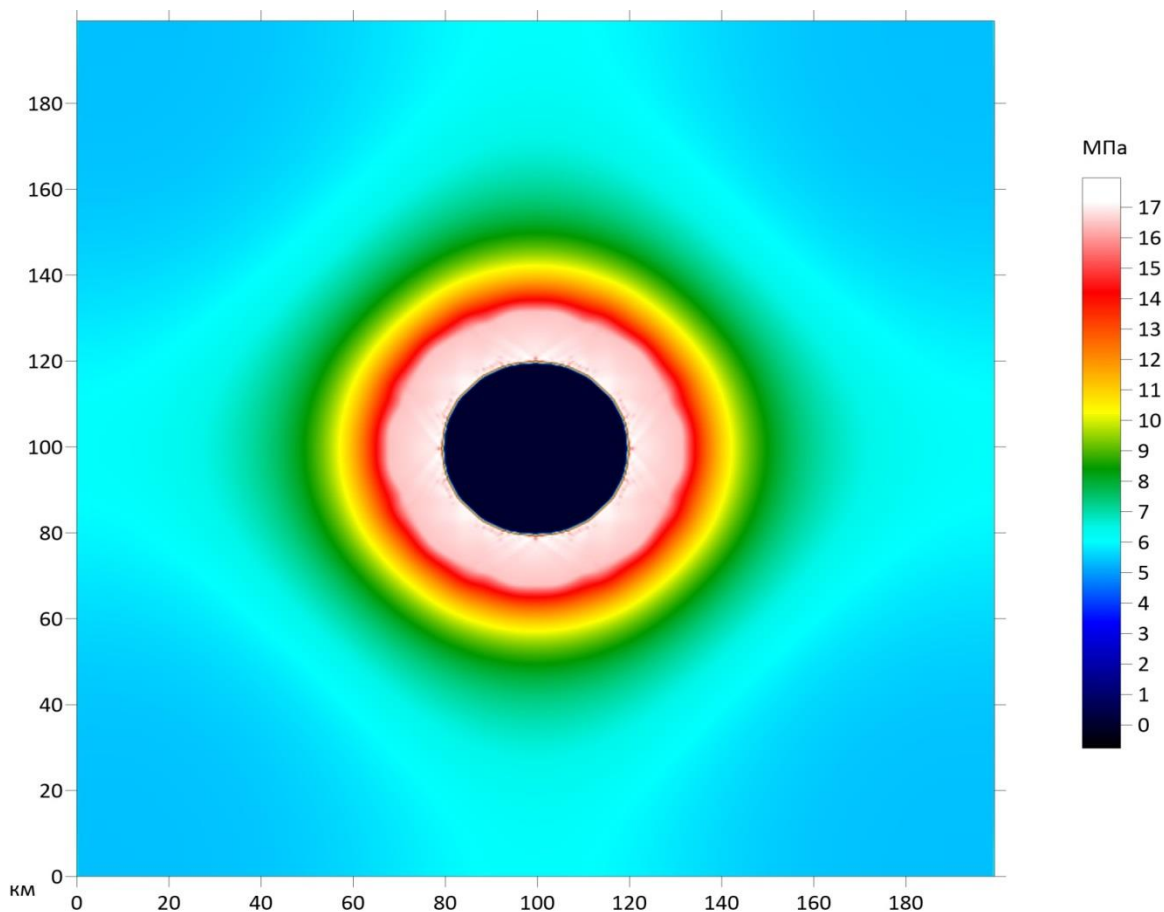


Рис. 4. Поле максимального касательного напряжения в модели изометричной интрузией (глубина 5 км)

Для рассмотренных интрузий различных типов показана геометрия зон генерации аномальных напряжений при формировании крупных даек различной длины при вариации уровня давления магмы. Показано, что наиболее обширная зона в области нагружения имеет геодинамический тип «горизонтальный сдвиг». Результаты моделирования показали, что даже единичная интрузия длиной в первые десятки км способна перестроить напряжённое состояние коры на большом от неё удалении. При этом напряжённое состояние в области нагружения может иметь геодинамический тип как горизонтальное сжатие, так и горизонтальный сдвиг и растяжения, в зависимости от удаления и ориентации интрузии. Таким образом, магматический фактор формирования надлитостатических напряжений должен рассматриваться в качестве одного из основных наряду с тектоническим при создании геодинамических региональных моделей.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. Мягков Д.С. Изучение особенностей напряжённого состояния коры в области внедрения крупных интрузий методом численного моделирования // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2025. С. 394–402.
2. Николаевский В.Н. Механика геоматериалов и землетрясения // Итоги науки и техники ВИНТИ. сер. Мех. деф. тв. тела. 1983. Т.15. С. 817–821.
3. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физ. мезомех. 2005. Т.8. №3. С. 129–142.
4. Уилкинс М.Л. Расчёт упруго-пластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир. 1967. С. 212–263.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ ТЕЛ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ. НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО СКЛАДЧАТОГО ПОЯСА

Мягков Д. С.¹

¹ – *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; dsm@ifz.ru*

В исследовании представлены численные геодинамические модели нагружения Земной коры при формировании интрузивных тел различной геометрии. Методом численного моделирования рассчитан уровень напряжений коры, связанный с давлением магмы системы транскоровых интрузий [Ребецкий, Стефанов, 2022], показаны особенности формирующихся геодинамических режимов напряжённого состояния коры. Представлена математическая модель формирования напряжённо-деформированного состояния земной коры Центрально-Азиатского складчатого пояса за счёт внедрения интрузий магматических поясов позднего палеозоя-раннего мезозоя. В численной модели представлены магматические пояса девон-юрского возраста, формирование которых связано с действием Алтайской, Селенгинской и Южно-Монгольской вулканических дуг.

Моделирование проводилось по численной методике, разработанной Уилкинсом для исследования упругопластических тел [Уилкинс, 1967] и усовершенствованной Ю.П. Стефановым [Стефанов, 2005] для применения в геомеханике [Николаевский, 1972]. Особенности данного подхода, следующие: применяется явная конечно-разностная схема, причём уравнения движения записываются именно в динамической форме с сохранением инерционного члена как для реальных динамических задач. Каждое воздействие на систему рассматривается в качестве переходного процесса, для которого вводится эффективное «искусственное» время, обычно пропорциональное времени пробега р-волны через всю модель. В алгоритм вводятся искусственные вязкости, которые подбираются индивидуально для каждой задачи таким образом, чтобы по истечению эффективного промежутка времени упругие волны, вызванные воздействием, затухли. Таким образом моделируются квазистатические процессы. Более подробно методика моделирования и процесс создания цифровой сейсмо-плотностной и геомеханической модели по данной методике описан в работе [Ребецкий и др., 2018].

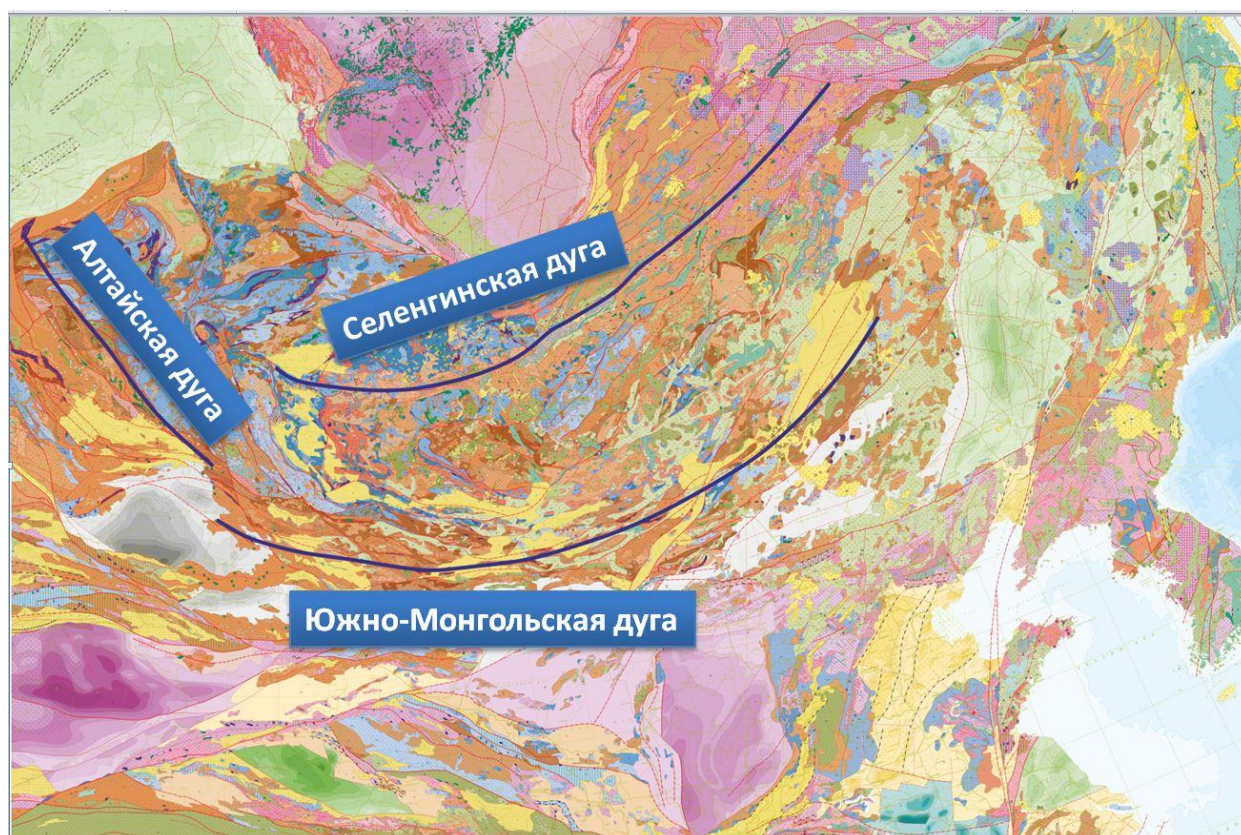


Рис. 1. Геометрия магматических поясов на геологической карте в проекции Меркатора

На рис. 1 представлена геометрия магматических поясов центральной часть Центрально-Азиатского складчатого пояса. В качестве источника нагружения коры рассматриваются магматические пояса девон-юрского возраста: магматический пояс Алтайской дуги (Девон – Ранний Карбон, 381-290 млн. л.), Южно-Монгольской дуги (Карбон-Триас, 320-203 млн.л.) и Селенгинской дуги (Пермь-Триас, 295-135 млн.л.). существование данных дуг связано с субдукцией, происходящей в закрывающемся Палеоазиатском океане и Монголо-Охотском бассейне.

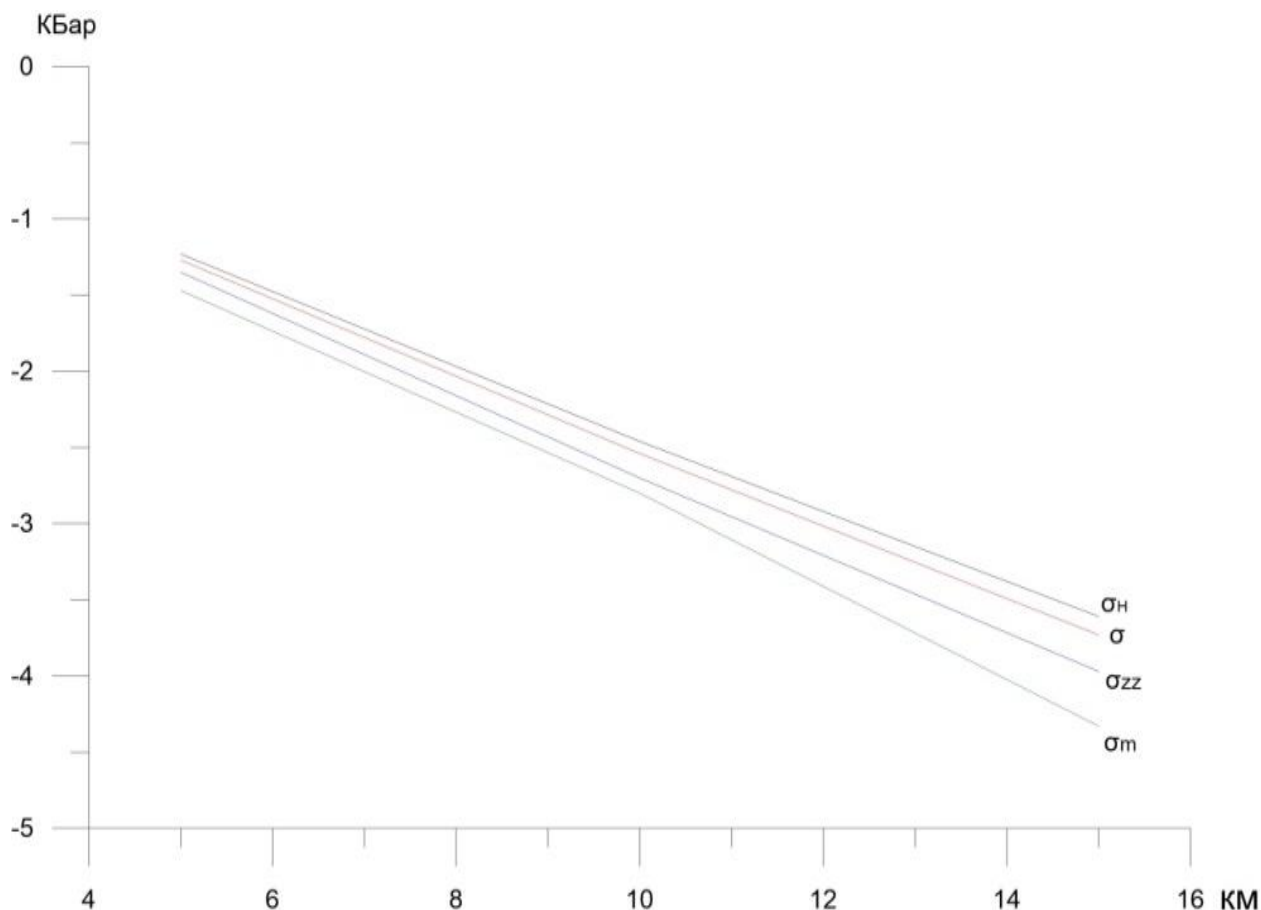


Рис. 2. Начальные условия: распределение литостатических напряжений и давления магмы в интрузиях с глубиной в модели. σ_m – распределение давления магмы в интрузиях (в виде первого инварианта тензора напряжений) с глубиной, σ_{zz} – распределение вертикального нормального литостатического давления с глубиной, σ_n – горизонтального и σ – среднего

На рис. 2 представлены графики для компонент тензора напряжений в начальном состоянии модели (начальные условия) и давления магмы с глубиной. Состояние интрузий рассчитывается из соображений нахождения очага ниже 40 км (кровля очага). Давление в очаге равно литостатике. Так как тип напряжённого состояния – плоская деформация, то уровень по глубине можно задать в виде вертикальной компоненты нормального напряжения. Примем: $H = 15$ км: $\sigma = -3.73$ КБар $\sigma_{zz} = -3.97$ КБар $\sigma_{гор} = -3.61$ КБар. Девиатор вертикальных напряжений dzz будет равен 0.25 КБар. Давление и плотность магмы на этой глубине $\rho_m = 2.67$ кг/м³, $\rho_m = 4.37$, КБар = 109% σ (по модулю). Для $H = 10$ км $\sigma = -2.54$ КБар $\sigma_{zz} = -2.7$ КБар $\sigma_{гор} = -2.46$ КБар. При этом девиатор вертикальных напряжений dzz будет равен 0.16 КБар. Давление магмы в интрузиях будет на 10.3 % больше литостатического на данной глубине и составит 2.98 КБар. Этапы моделирования соответствуют последовательной активации гравитационной нагрузке (на глубине, выбранной для конкретного расчёта, ниже представлены результаты для глубины 10 км) и плавления вещества магматических поясов (по очереди от старшего к младшему) с ростом давления в них вплоть до достижения давления магмы на соответствующей глубине.

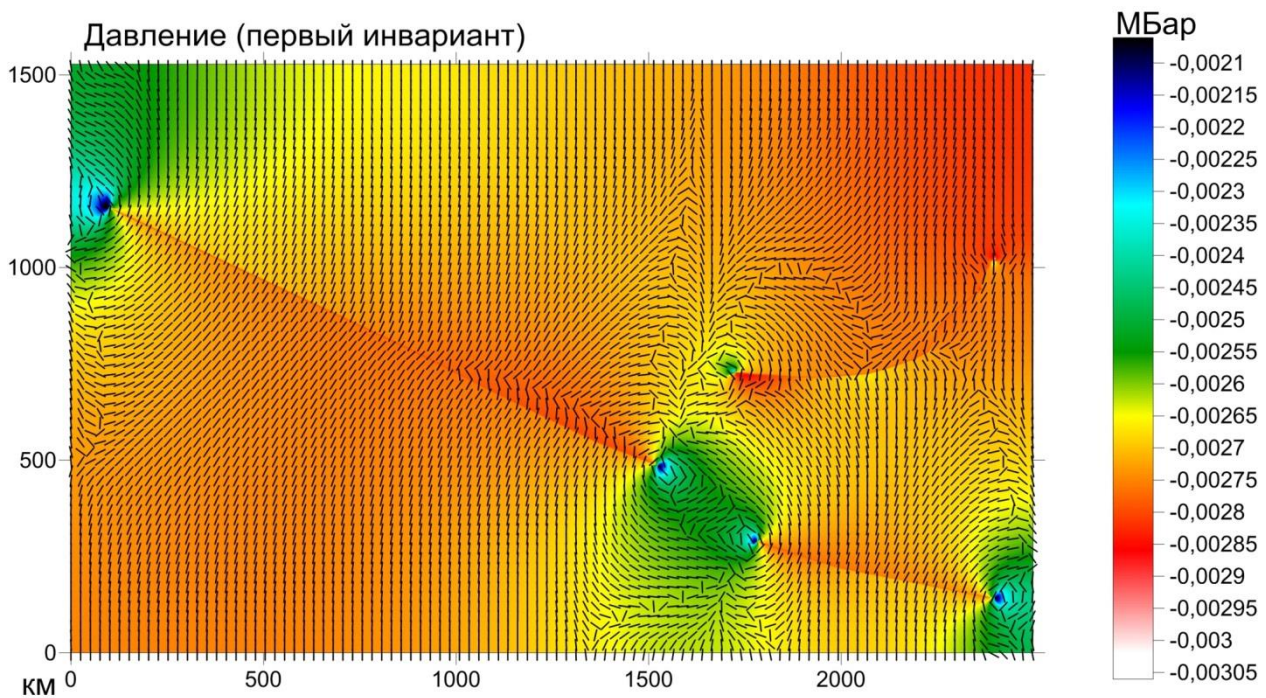


Рис. 3. Напряжённое состояние – первый инвариант (давление) и ориентации осей максимального горизонтального сжатия для глубины 10 км

Результаты моделирования представлены на рис. 3 и рис. 4. Распределение давления и ориентации оси максимального горизонтального сжатия показаны на рис. 3. Отметим, что колебания уровня средних нормальных напряжений относительно начального уровня $\sigma = -2.54$ составляет ~ 0.4 КБар, что соответствует и даже несколько превышает уровень современных аномальных напряжений в континентальной коре Евразийской плиты, полученный по данным сейсмологии. Можно выделить следующие закономерности: близ боковой поверхности интрузии ось σ_H преимущественно перпендикулярна простиранию интрузии. Это даёт СЗ – ССЗ простирание σ_H близ Алтайского пояса с постепенным выравниванием в меридиональном направлении ближе к северной части модели (в области Саянского орогена). Уровень напряжений близ интрузий связан как давлением магмы в интрузиях, так с геометрией и взаимным расположением поясов.

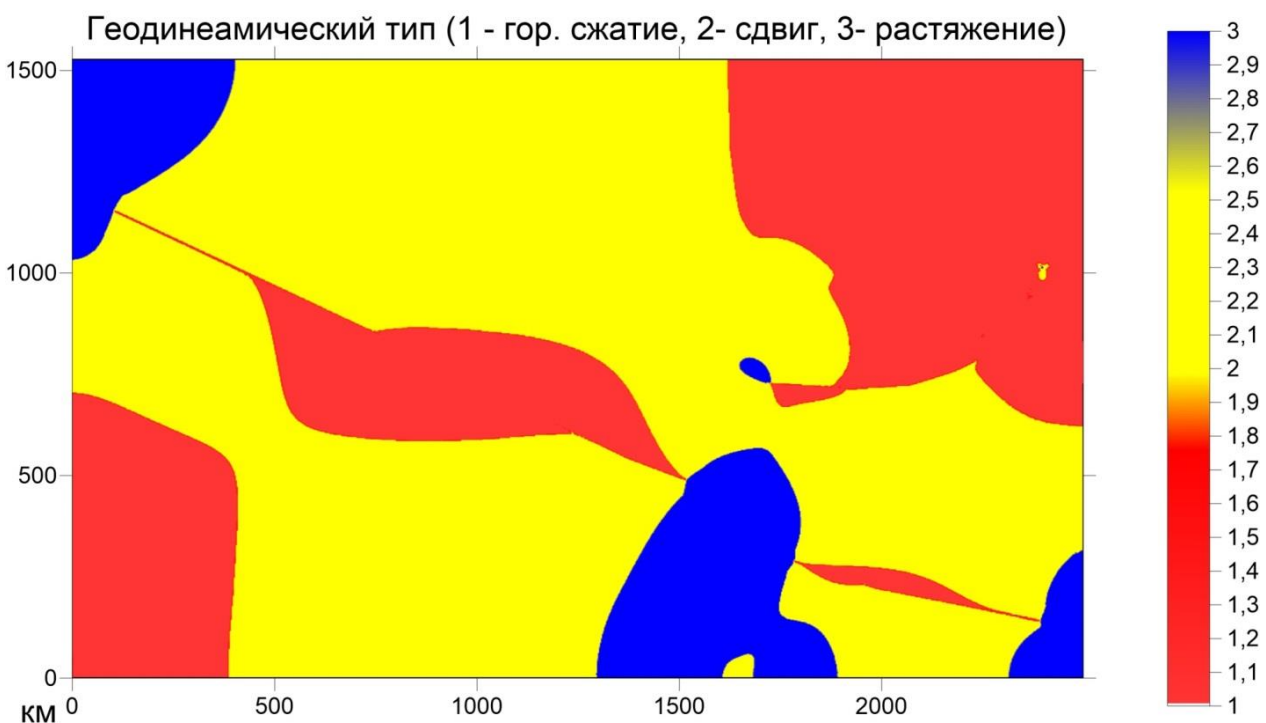


Рис. 4. Геодинамический тип напряжённого состояния для глубины 10 км

Рассмотрим теперь распределение геодинамических типов напряжённого состояния, представленных на рис. 4. Для центральной и восточной части АП на расстоянии 150-200 км от пояса формируется горизонтальное сжатие. Для ЮМП аналогичная ситуация, но ширина этой зоны около 50 км в одну сторону от пояса. Вокруг западной части АП преобладает сдвиговая обстановка, тогда как вокруг обоих концов пояса – горизонтальное растяжение. Последнее сливается с аналогичной зоной для западного конца ЮМП, формируя единую зону растяжения от восточной части Джунгарской котловины до южной и центральной части котловины Больших Озёр. Южнее СП преобладает сдвиговая обстановка, также, как и к северу от западной части СП. Однако близ концевой точки в северном направлении формируется зона растяжения, соответствующая части Убсунурской котловины. К северу от восточной части СП в области Восточного Саяна формируется горизонтальное сжатие.

Полученные результаты показывают, что уровень нагружения земной коры при формировании крупных общекоровых систем интрузий сопоставим с общим уровнем напряжений, что означает, что формирование интрузий может являться основным механизмом генерации тектонических напряжений. Геодинамические типы напряжённого состояния, формируемых в коре магматическими поясами, с высокой степенью корреляции совпали с таковыми поля напряжений из тектонофизической реконструкции.

Уровень аномальных напряжений, (первые десятки КБар) сопоставим с общим уровнем напряжений коры внутриконтинентальных орогенов, что означает, что формирование транскоровых интрузий может являться основным механизмом генерации тектонических напряжений Центрально-Азиатского складчатого пояса и южной части Сибирского кратона. Зоны растяжения по данным моделирования оказались приурочены преимущественно к межгорным впадинам, что является дополнительным аргументом в пользу ведущей роли магматического фактора в процессе генерации напряжений ЦАСП.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. Николаевский В.Н. Механика геоматериалов и землетрясения // Итоги науки и техники ВИНТИ. сер. Мех. деф. тв. тела. М.: 1983. Т.15. С. 817–821.
2. Ребецкий Ю.Л., Погорелов В.В., Мягков Д.С., Ермаков В.А. О генезисе напряжений в коре островной дуги по результатам численного моделирования // Вестник КРАУНЦ. 2018. №3. С. 54–73.
3. Ребецкий Ю.Л., Стефанов Ю.П. О механизме взаимодействия сильных землетрясений и вулканизма в зонах субдукции // Вестник Камчатской региональной ассоциации "Учебно-научный центр". Серия: Науки о Земле. 2022. Т.4. №56. С. 41–58.
4. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физ. мезомех. 2005. Т.8. №3. С. 129–142.
5. Уилкинс М.Л. Расчёт упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир. 1967. С. 212–263.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ ЛОКАЛИЗОВАННОГО СДВИГА

Мягков Д. С.¹

¹ – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; dsm@ifz.ru

В данной работе изучается проблема дальнего действия разлома (или зоны локализованного сдвига) в упруго-пластической среде, находящейся в закритическом состоянии (за счёт действия литостатического напряжения). Вопрос о характере затухания напряжённого состояния вдали от сдвигового разрывного нарушения является важным как для тектонофизики, в частности для вопроса о дальнем действии очага землетрясения, так и для геомеханики, где особую актуальность исследование формирования напряжённого состояния в трещиноватой среде получает в приложении к задачам ГРП. При этом очевидные ограничения экспериментальных данных и физического моделирования можно компенсировать применением математического моделирования. Представлена численная модель затухания напряжений в области развития локализованного сдвига, показаны особенности затухания для случая упругой среды и упруго-пластической с различными законами пластичности.

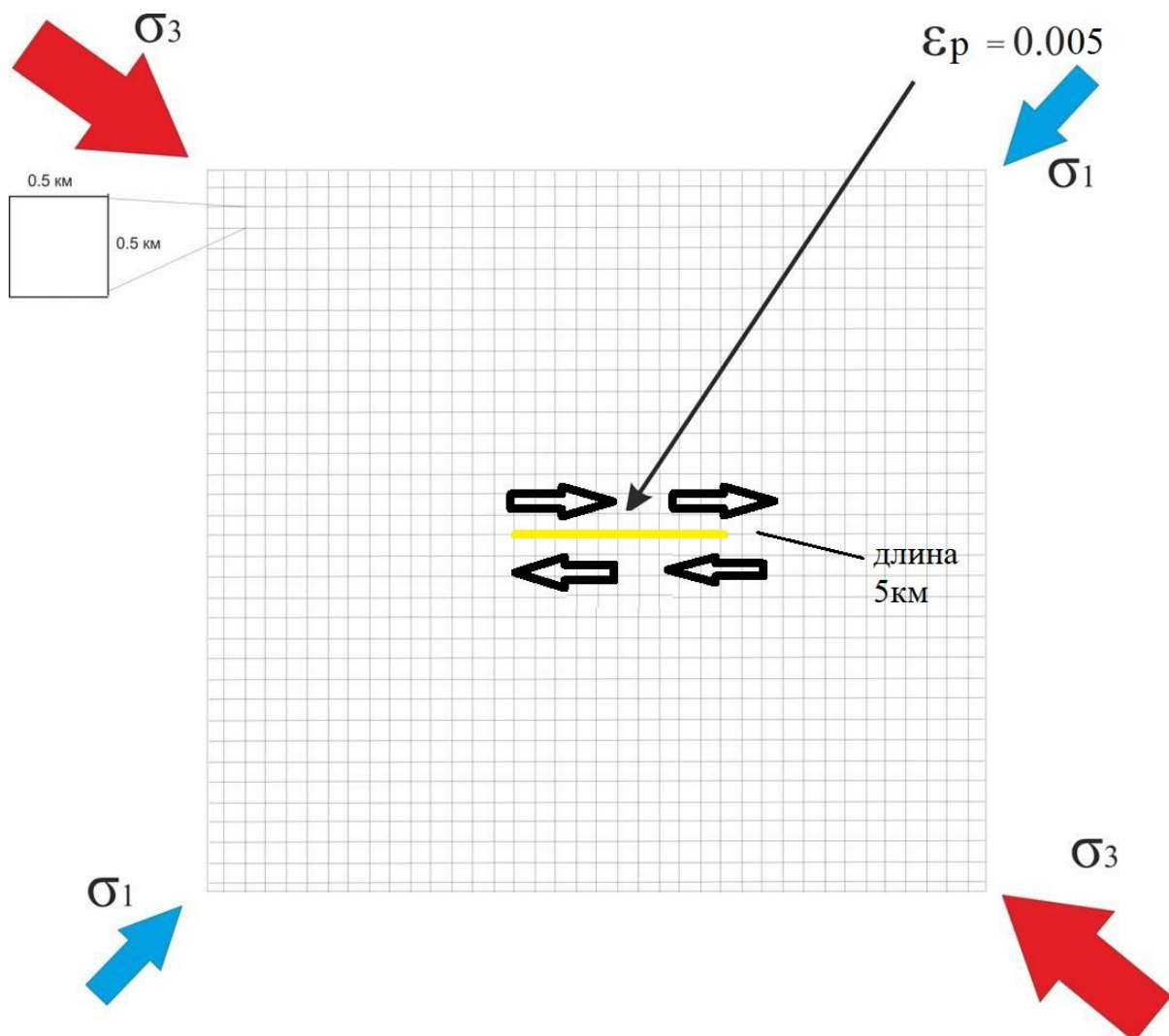


Рис. 1. Общая схема моделей серии численных экспериментов

Для численного расчёта применялась явная конечно-разностная схема, разработанная Уилкинсом для исследования упруго-пластических тел и усовершенствованная Стефановым [Стефанов, 2005] для применения в геомеханике. Тела модели рассматриваются как

упругопластические. В отличие от классического подхода Уилкинса, в данном подходе берётся более сложная и подходящая для геосреды модифицированная модель Друкера-Прагера-Николаевского [Николаевский, 1972]. Модель на рис. 1 состоит из идентичных ячеек размером 500 x 500 м, общее количество ячеек составляет 25000. Тела модели рассматривались как упрочняющиеся упругопластические с законом пластического течения Друкера-Прагера-Николаевского для коры и Мизеса для мантии [Николаевский, 1972]. Для коровой части помимо параметров, указанных в таблице 1, введён параметр «коэффициент дилатансии», равный 0.3 [Николаевский, 1972].

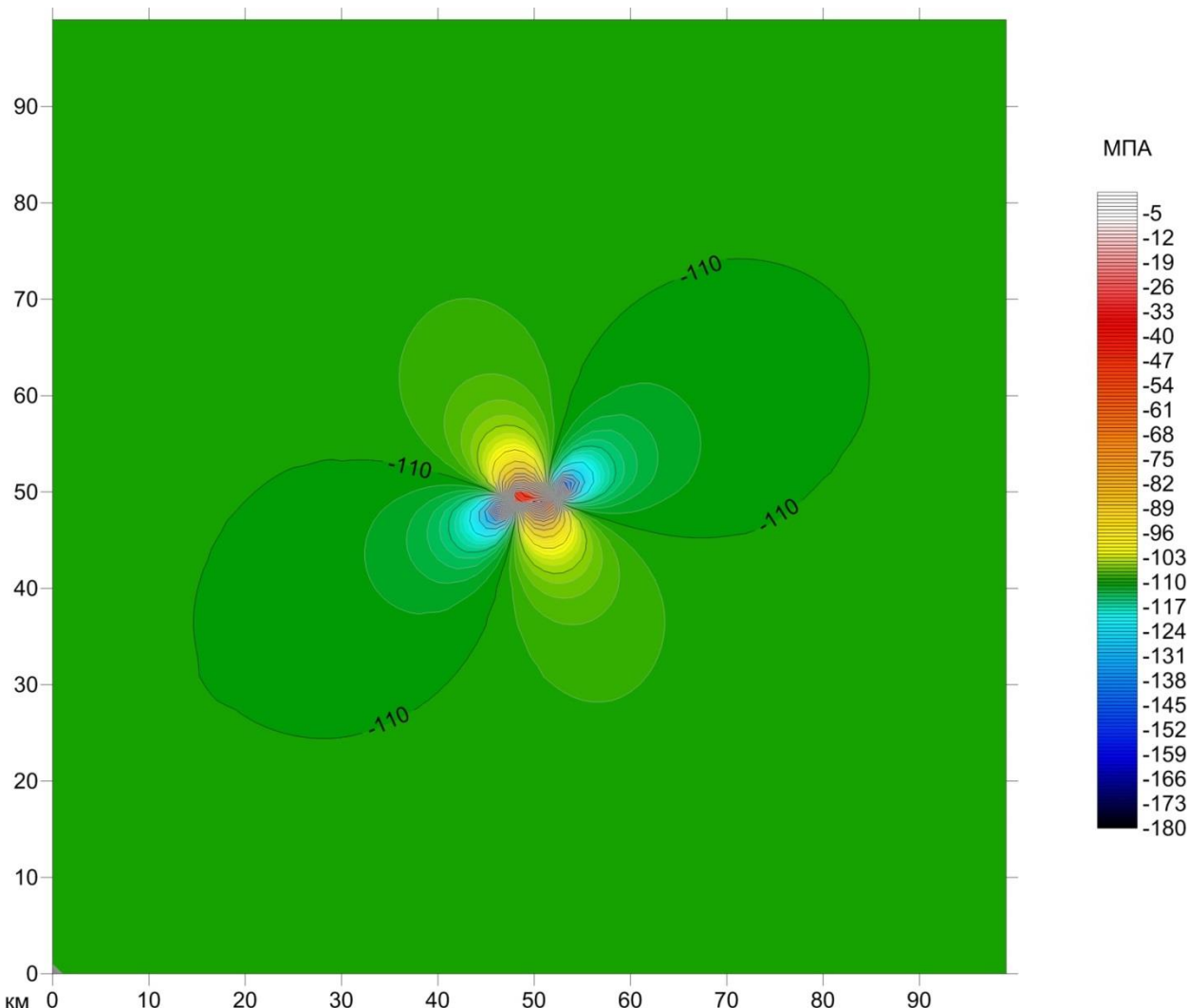


Рис. 2. Результаты моделирования – давление (шаровая часть тензора напряжений). Данные получены для упругой модели

Для расчёта исследуемого эффекта была создана двумерная модель, в которой начальное напряжённое состояние превышало уровне прочности среды таким образом, что все ячейки модели находятся в закритическом состоянии в нулевой момент времени. Общая схема моделей серии численных экспериментов, представленных ниже, дана на рис. 1. В качестве начальных условий задавались различные варианты напряжённого состояния, характеристики поля напряжений, используемого для представленных на рис. 2 и рис. 3 результатов расчёта, даны на рис. 1, где также представлена общая схема модели.

Ось максимального сжатия σ_3 ориентирована под углом 45° к горизонтали, также, как и σ_1 . При этом расположение σ_3 таково, чтобы для горизонтальных разрывов реализовывался правый сдвиг. Компоненты тензора по амплитуде (считаем ось X горизонтальной и Y - вертикальной): $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 110$ МПа, $\sigma_{xy} = 75$ МПа. Когезия принимается равной 25 МПа, коэффициент угла внутреннего трения - 0.05. Плотность – 2.7 г/см³, скорость продольных волн – 6.7 км/с.

Модель занимает пространство 100×100 км, в центре по у-координате выделяется горизонтальная полоса шириной 200 м и длиной 5 км, в которой будут снижаться упругоплотностные или прочностные параметры, инициируя движение, соответствующее движению по

разлому. Для упругого случая снижается (на 90%) величина упругих модулей и на 50% плотность, для упруго-пластической модели снижается когезия (на 90%). После реализации сдвиговой деформации в заданном изначально поле напряжений, формируется новое напряжённо-деформированное состояние с аномалией сдвигового типа. Рассмотрим полученные результаты, представленные на рис. 2 и рис. 3.

На рис. 2 представлено поле давления (в виде первого инварианта тензора напряжений), полученное для упругого случая. Несмотря на существенно ненулевую длину разлома, полученное решение отличается достаточно высокой симметрией положительных и отрицательных аномалий давления, положительные аномалии чуть резче проявляются в несколько более узком секторе близ соответствующих (верхнем правом и нижнем левом) краях разлома. В касательных напряжениях имеются парные максимумы и минимумы. Так как в упругом случае среда близ разрыва не могла пластически разгрузиться, то общий уровень напряжений несколько выше, чем в пластическом, однако интересующий нас закон затухания компонент тензора напряжений близок к $1/r^2$, что отвечает теоретическим представлением. Такое затухание объясняется двумерной постановкой задачи (тип напряжённого состояния – плоская деформация).

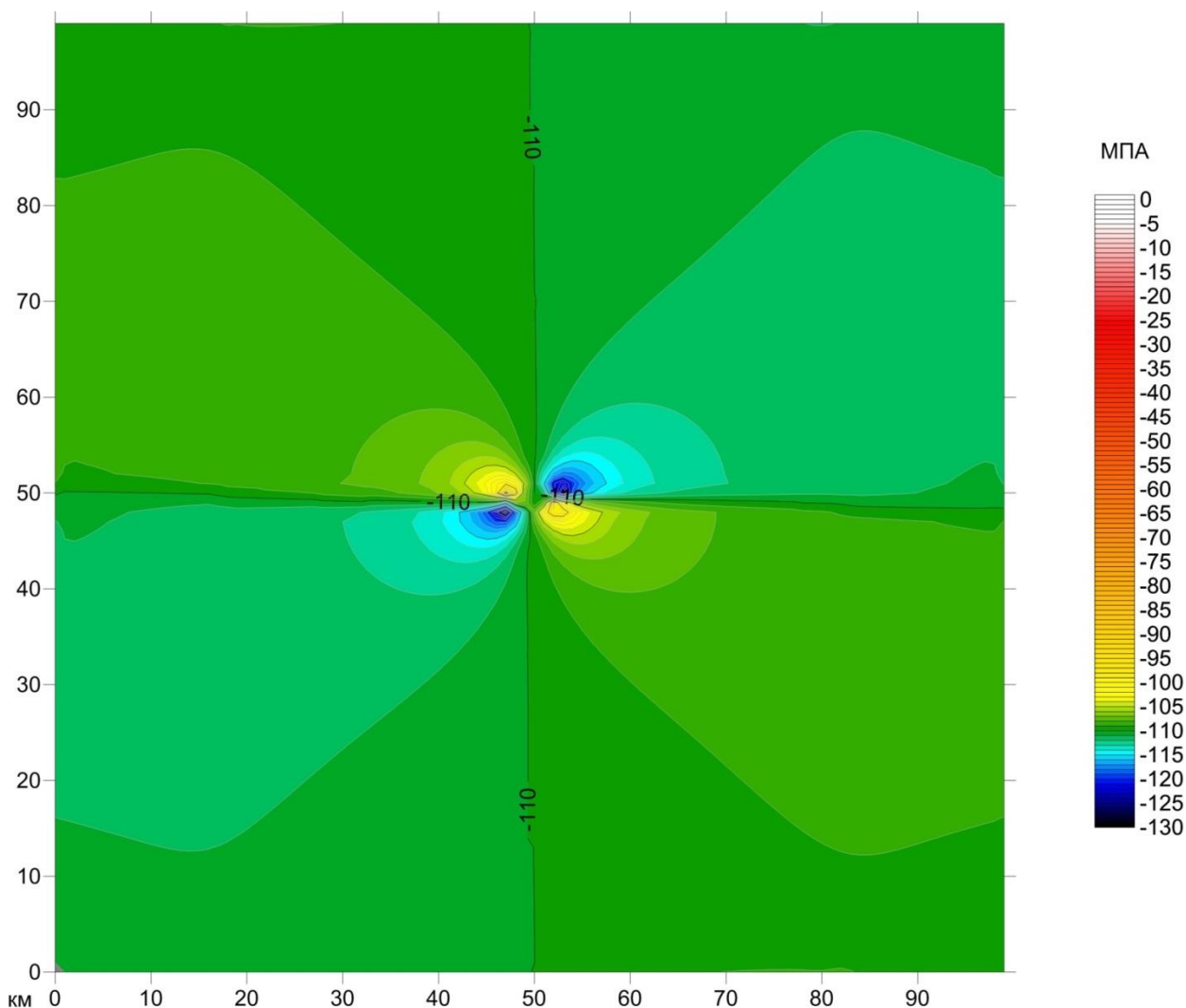


Рис. 3. Результаты моделирования – давление (шаровая часть тензора напряжений). Данные получены для упруго-пластической модели

На рис. 3 представлены результаты моделирования для упруго-пластической постановки. В этом случае упруго-плотностные характеристики среды оставались неизменными. При понижении когезии реализовывался сдвиг, общая накопленная сдвиговая деформация к концу процесса равна 0.005. Так как в данной модели принято достаточно низкое (25 МПа) начальное значение когезии, то мы видим несколько более низкие по амплитуде максимумы и минимумы давления близ концевых участков зоны разлома. При этом сами аномалии становятся менее симметричными и сильнее начинает проявляться протяжённость разлома, отрицательные аномалии давления не сливаются друг с

другом, формируя отдельные зоны близ левого верхнего и нижнего правого краёв разлома. Каждая в отдельности зона как максимумы, так и минимумы, теряют пространственную симметрию и выполаживаются вдоль разлома, линия, проходящая через центр аномалий наклонена существенно (15°) ближе к линии разлома. Исследуемый здесь закон затухания компонент тензора напряжений, в т.ч. давления на рис. 3 приближается к закону $1/n$, что хорошо соответствует аналитическому решению, полученному Ребецким [Ребецкий, Лермонтова, 2014]. Таким образом, можно утверждать, что результаты моделирования показали существенно более низкое затухание поля напряжений в дальней зоне локализованного сдвига в находящейся в закритическом состоянии среде. Отметим, что согласно современным представлениям, средняя и нижняя кора находится в катакластическом состоянии, поведение среды при таком состоянии близко к таковому в пластическом. В верхней коре в закритическом состоянии находятся зоны локализации деформаций близ крупных разломов, которые также могут осуществлять полученное в представленной здесь модели дальнедействующее влияние.

Результаты моделирования подтверждают положение, полученное Ю.Л. Ребецким из решения одномерной аналитической задачи о значительно более медленном (на порядок) затухании амплитуд компонент тензора напряжения в среде, изначально находящейся в закритическом состоянии по сравнению с упругим состоянием среды (вдали от разлома). Показаны картины напряжённого состояния вдали от разлома при разных законах пластичности.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. Ребецкий Ю.Л., Лермонтова А.С. Аналитическое решение задачи для совокупности трещин сдвига с кулоновым трением // Доклады РАН. 2010. Т.435. №6. С. 821–825.
2. Ребецкий Ю.Л., Погорелов В.В., Мягков Д.С., Ермаков В.А. О генезисе напряжений в коре островной дуги по результатам численного моделирования // Вестник КРАУНЦ. 2018. №3. С. 54–73.
3. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физ. мезомех. 2005. Т.8. №3. С. 129–142.
4. Уилкинс М.Л. Расчёт упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир. 1967. С. 212–263.

УТОЧНЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В РАЙОНЕ ДЕЛЬТЫ Р. ЛЕНЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Новиков М. А.^{1,2}, Крылов А. А.^{1,2}

¹ – Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия; mihail.novikow@mail.ru

² – НГУ «Сириус», федеральная территория Сириус, Россия

Дельта р. Лены является крупнейшей в Арктике, и отличается сложным строением и малой инструментальной изученностью [Are & Reimnitz, 2000]. По действующим нормативным картам общего сейсмического районирования (ОСР-2015) зона относится к повышенной сейсмичности, для Тикси допускается вероятность превышения 8-10 баллов MSK за 50 лет [СП 14.13330.2018]. При этом для обширных шельфовых участков нормативных карт нет, а обобщающие модели неизбежно сглаживают локальные особенности строения и очагового процесса. В последние годы локальные сети на шельфе моря Лаптевых [Krylov et al., 2021; Krylov et al., 2023] и в дельте [Plötz et al., 2025; Novikov et al., 2025] существенно дополнили каталоги событий, что позволяет уточнить параметры сейсмического режима и сопоставить их с используемыми в районировании линейно-доменными моделями (ЛДФ-моделями).

Целью настоящей работы является уточнение параметров сейсмического режима для района дельты р. Лены с использованием накопленного объема современных сейсмологических данных. Задачи включают в себя составление единого сводного локального каталога, уточнение положения основных линейных сейсмогенерирующих структур по распределению очагов из этого каталога, определение основных параметров графиков повторяемости, положения сейсмогенного слоя коры, максимальной возможной магнитуды M_{max} и обобщенных механизмов очагов для выделенных основных сейсмолинеаментов в исследуемой области [Новиков и др., 2025].

Для анализа имеющихся данных о сейсмичности дельты р. Лены, в рамках данной работы был скомпилирован сводный каталог дельты р. Лены (далее – Сводный каталог). Основой послужил «Объединённый каталог землетрясений восточного сектора российской Арктики» [Gvishiani et al., 2022], включающий данные каталогов ISC [ISC-GEM, 2023], «Землетрясения России» [База данных «Землетрясения России»], «Землетрясения СССР» [Горбунова и др., 1980] и других источников за 1962-2019 годы. Сводный каталог был дополнен событиями из базы «Землетрясения России» за 2019-2023 годы, а также событиями из каталога ISC за 1918-1962 годы. В каталог вошли события в пределах 70-75° северной широты и 120-135° восточной долготы. Сводный каталог был очищен от кластеров с использованием классической процедуры декластеризации [Gardner and Knopoff, 1974].

На рис. 1 представлена карта эпицентров землетрясений и их плотности в соответствии со Сводным каталогом, а также расположение активных разломов согласно базе AFEAD [Бачманов и др., 2017]. Наиболее четко выделяются два вытянутых скопления эпицентров: первая зона пересекает дельту с северо-запада на юго-восток от Оленекского залива до губы Буор-Хая вдоль Оленекской и Быковской проток. Данное скопление эпицентров обозначим как сейсмолинеамент «Оленек». Вторая зона северо-восточного простирания проходит по центру губы Буор-Хая и заходит на сушу. Данное скопление эпицентров обозначим как сейсмолинеамент «Буор-Хая».

Для обоих сейсмолинеаментов были построены графики повторяемости и оценены магнитуда полноты M_c , параметры a и b в законе Гутенберга-Рихтера [Аки, 1965]. Кроме того, для обоих сейсмолинеаментов были оценены их максимальные магнитуды (M_{max}) по алгоритму, описанному в [Pisarenko et al., 1996]. Данный метод основан на байсовском подходе: априорное (равномерное) распределение M_{max} итеративно уточняется при учете данных Сводного каталога землетрясений. В результате было получено апостериорное распределение максимальных магнитуд, а итоговая оценка M_{max} была получена как медиана данного распределения.

Для линеаментов «Оленек» и «Буор-Хая» были определены ориентации главных осей напряжений в коре [Крылов и др., 2023]. Данные зоны характеризуются разными сеймотектоническими обстановками: «Оленек» находится на фланге Лено-Анабарского сегмента Верхоянской складчатой системы, а «Буор-Хая» включает в себя Хараулахский сегмент Верхоянской складчатой системы и юго-восточный фланг Усть-Ленской рифтовой системы [Аветисов, 2000; Имаева и др., 2019]. Каждая зона содержит по восемь известных механизмов очагов землетрясений с $M_{max} \geq 3.5$ [Fujita et al., 2009; Global Centroid-Moment-Tensor, 2023; ISC-GEM, 2023].

Итоговые параметры для сейсмолинементов «Оленек» и «Буор-Хая» приведены в таблице 1. Следует отметить, что положение и параметры сейсмолинементов определены исключительно по сейсмологическим данным (Сводный каталог, а также известные механизмы очагов и палеосейсмодислокация).

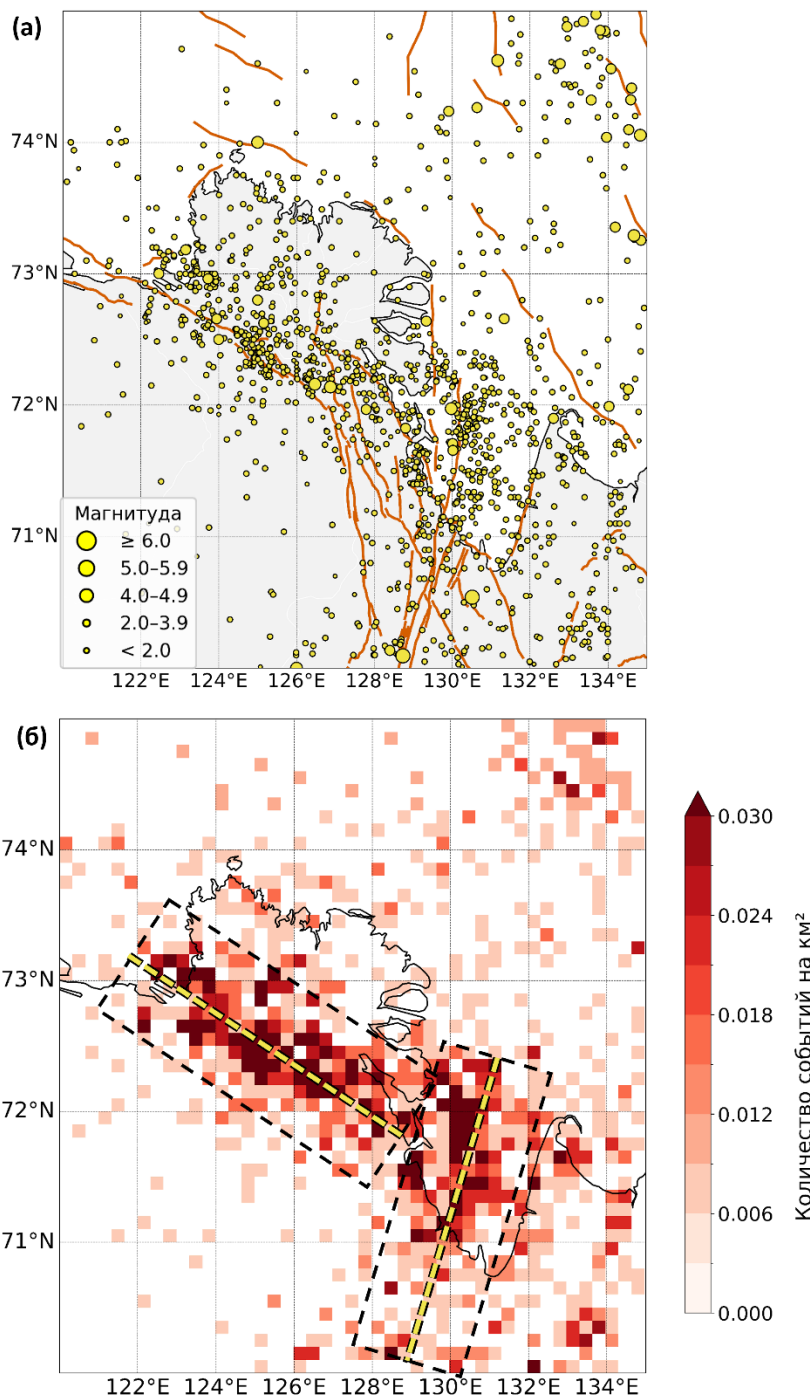


Рис. 1. (а) – распределение эпицентров землетрясений в районе дельты р. Лены по данным Сводного каталога; (б) – карта плотности эпицентров на основе той же выборки. Оранжевыми линиями показаны активные разломы в соответствии с базой данных AFEAD. Черными пунктирными линиями показаны границы зон сейсмолинементов «Оленек» и «Буор-Хая», желтыми линиями – их осевые направления

Таблица 1. Параметры сейсмолинементов «Оленек» и «Буор-Хая», выделенных в дельте р. Лены

№	M_{max}	a	b	Hmin	Hmax	Strike,°	Dip,°	Slip,°
«Оленек»	6.2	4.11	0.81	5	30	165	71	168
«Буор-Хая»	7.6	4.03	0.79	5	30	198	33	-73

Для анализа существующих ЛДФ-моделей в районе дельты р. Лены были построены вертикальные сечения, показывающие количество очагов землетрясений вдоль профилей, перпендикулярных основным сейсмолинеаментам из моделей ОСР-97 (рис. 2) и ОСР-2016 (рис. 3). Ожидается, что по модели ОСР эпицентры землетрясений будут образовывать нормальное распределение с максимумом вблизи осевой линии сейсмолинеамента.

Рис. 2 показывает, что не всегда максимум нормального распределения количества очагов землетрясений вдоль профилей соответствует линии пересечения с сейсмолинеаментами. Это наблюдается даже с учетом среднего разброса очагов ± 10 км от их осевых линий: данный диапазон найден, исходя из средней глубины очагов ~ 15 км и угла падения разломов $\sim 60^\circ$ (диапазон разброса обозначен на рис. 2б, в и рис. 3б, в). На разрезе А–В распределение сейсмичности четко соответствует только расположению сейсмолинеамента III (рис. 2б).

Расположение сейсмолинеаментов согласно модели ОСР-2016 (рис. 3) в меньшей степени соответствует распределению сейсмичности по сравнению с моделью ОСР-97. Максимум нормального распределения количества очагов землетрясений вдоль профиля А–В не соответствует линии пересечения с ни одной из осей сейсмолинеаментов (№ 1–4) в районе дельты – рис. 3а. Вдоль профиля С–D наибольший максимум распределения соответствует положению только одного из трёх сейсмолинеаментов (№ 6) в районе губы Буор-Хая – рис. 3б.

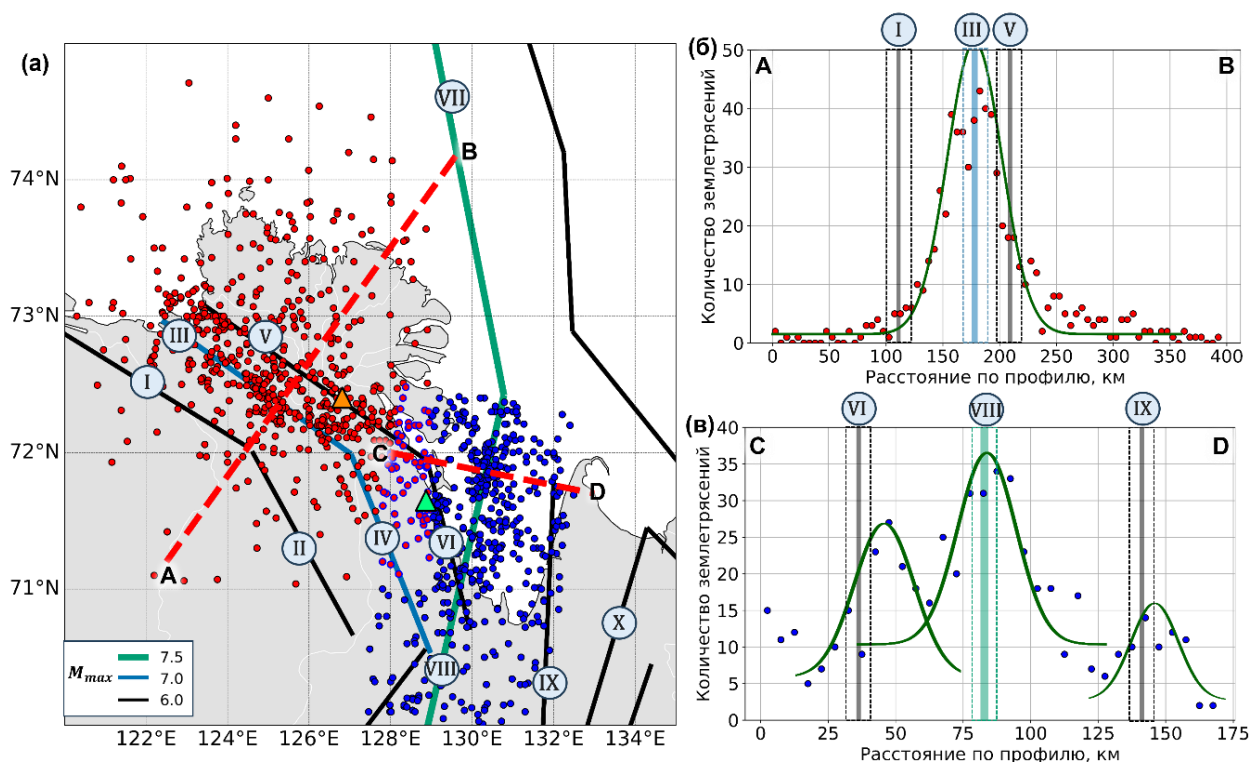


Рис. 2. Распределение эпицентров землетрясений в районе дельты р. Лены на фоне сейсмолинеаментов из ЛДФ-модели ОСР-97 (а); распределение количества очагов землетрясений вдоль профилей (сечения) А–В (б) и С–D (в). На рис. (а) изображены только очаги в коридорах, использованные для построения сечений. Зеленый треугольник – расположение сейсмостанции «Тикси», оранжевый треугольник – расположение сейсмостанции «Столб». Красные круги – события, вошедшие в сечение А–В, синие – в С–D, красные с синей обводкой – в оба сечения. На рис. (б) и (в) цветными линиями обозначены пересечения с сейсмолинеаментами, а пунктирными линиями – границы среднего возможного разброса очагов ± 10 км от их осевой линии (см. пояснения в тексте)

Итак, по современным сейсмологическим данным были уточнены параметры сейсмического режима района дельты р. Лены. Выделены две основные сейсмоактивные линейные зоны – сейсмолинеаменты «Оленек» и «Буор-Хая», установлены их характеристики по глубине очагов, типу напряжённого состояния, максимальной магнитуде и повторяемости землетрясений. Сопоставление распределения сейсмичности с моделями зон возникновения очагов землетрясений для карт ОСР-97 и ОСР-2016 показало необходимость корректировки существующих моделей для более точного учета локальных особенностей региона. Полученные результаты могут быть использованы для детального сейсмического районирования района дельты р. Лены.

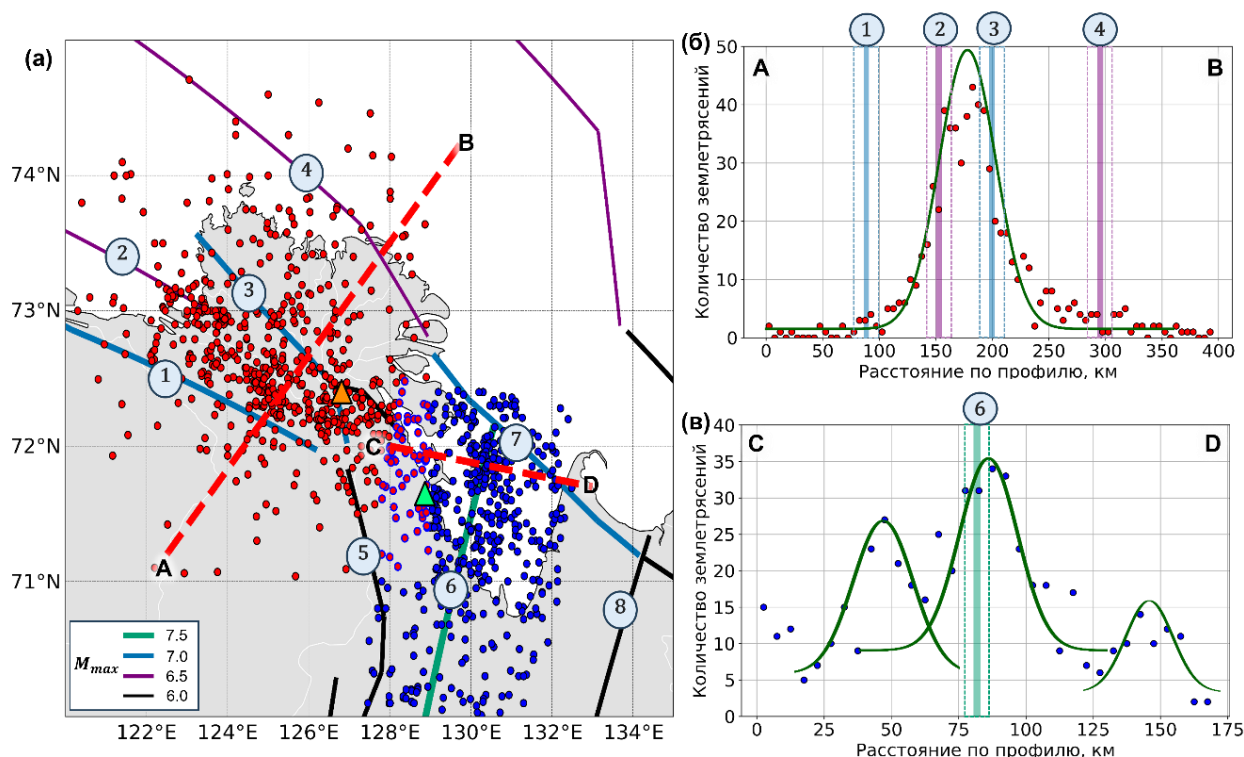


Рис. 3. Распределение эпицентров землетрясений в районе дельты р. Лены на фоне сейсмолинеаментов из ЛДФ-модели ОСР-2016 (а); распределение количества очагов землетрясений вдоль профилей (сечения) А-В (б) и С-Д (в). На рис. (а) изображены только очаги в коридорах, использованные для построения сечений. Зеленый треугольник – расположение сейсмостанции «Тикси», оранжевый треугольник – расположение сейсмостанции «Столб». Красные круги – события, вошедшие в сечение А-В, синие – в С-Д, красные с синей обводкой – в оба сечения. На рис. (б) и (в) цветными линиями обозначены пересечения с сейсмолинеаментами, а пунктирными линиями – границы среднего возможного разброса очагов ± 10 км от их осевой линии (см. пояснения в тексте)

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке государственного задания РФ, проект № FMWE-2024-0026 (определение ориентации главных осей напряжений в коре); Российского научного фонда, проект № 23-17-00125 (уточнение параметров сейсмического режима); и гранта государственной программы федерального округа «Сириус» «Научно-технологическое развитие федерального округа «Сириус», соглашение № 18-03 от 10.09.2024 (определение скоростной модели коры).

Литература

1. Аветисов Г.П. Еще раз о землетрясениях моря Лаптевых // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. – СПб.: ВНИИОкеангеология. 2000. Вып.3. С. 104–114.
2. База данных «Землетрясения России» // Единая геофизическая служба РАН: электронный ресурс. – URL: <http://eqru.gsras.ru/>. Дата обращения: 12.12.2024.
3. Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т.8. №4. С. 711–736.
4. Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С. Динамика рельефа и сеймотектоническая активизация новейших структур дельты р. Лена // Геотектоника. 2019. №5. С. 62–77.
5. Крылов А.А., Лобковский Л.И., Ковачев С.А. и др. Геодинамические режимы в Лаптевоморском регионе согласно новейшим сейсмологическим данным // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т.513. №2. С. 224–230.
6. Новиков М.А., Крылов А.А. Уточнение параметров сейсмического режима для района дельты р. Лены // Российский сейсмологический журнал. 2025. Т.7. №3. С. 31–48.
7. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* М.: Минстрой России. 2018.
8. Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - b m$ and its confidence limits // Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo. 1965. Vol.43. P. 237–238.

9. *Are F., Reimnitz E.* An overview of the Lena River Delta setting: geology, tectonics, geomorphology, and hydrology // *Journal of Coastal Research*. 2000. Vol.16. N.4. P. 1083–1093.
10. *Fujita K., Kozmin B.M., Mackey K.G. et al.* Seismotectonics of the Chersky seismic belt, eastern Russia (Yakutia) and Magadan district, Russia // *Geology, Geophysics and Tectonics of Northeastern Russia: A Tribute to Leonid Parfenov*. Stephan Mueller Special Publication Series. 2009. Vol.4. P. 117–145.
11. *Gardner J.K., Knopoff L.* Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1974. Vol.64. N1. P. 363–367.
12. *Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project* // Global CMT Web Page: электронный ресурс. – URL: <http://www.globalcmt.org>. Дата обращения: 05.10.2022.
13. *Krylov A.A., Egorov I.V., Kovachev S.A. et al.* Ocean-Bottom Seismographs Based on Broadband MET Sensors: Architecture and Deployment Case Study in the Arctic // *Sensors*. 2021. Vol.21. P. 3979.
14. *Krylov A.A., Novikov M.A., Kovachev S.A. et al.* Features of Seismological Observations in the Arctic Seas // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol.11. P. 2221.
15. *Novikov M.A., Krylov A.A., Radiuk E.A. et al.* Spatial Distribution and Seasonal Variability of Weak Seismicity in the Lena Delta (Laptev Sea Region) // *Pure and Applied Geophysics*. 2025.
16. *Pisarenko V.F., Lyubushin A.A., Lysenko V.B., Golubeva T.V.* Statistical estimation of seismic hazard parameters... // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1996. Vol.86. N3. P. 691–700.
17. *Plötz A., Krylov A.A., Geissler W.H., Shibaev S. et al.* Local seismicity along the Olenek Sector of the Lena–Anabar suture SW Laptev Sea Rift System – Rift-related or reactivation of the former passive margin of the Siberian Craton? // *Tectonophysics*. 2025. Vol.901. P. 230676.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ УЧАСТКОВ КОРЫ, ОПАСНЫХ ДЛЯ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Нугманов И. И.^{1,2}, Остапчук А. А.^{2,3}, Стахеев Е. А.⁴

¹ – АНО ВО «Университет Иннополис», г. Иннополис, Россия; *i.nugmanov@innopolis.ru*

² – Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

³ – Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия

⁴ – Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Топологическая и реологическая неоднородность тектонических разломов контролируют пространственное распределение сейсмичности и локализацию крупных мелко фокусных землетрясений. Структурные особенности разломов отчетливо проявляются в характеристиках фоновой сейсмичности. В данной работе представлено исследование алгоритма кластеризации (метод машинного обучения «без учителя») для выявления сейсмогенных участков. Алгоритм предназначен для анализа фоновой сейсмичности с целью определения тектонических «неровностей» – асперити. Участки асперити, обусловленные морфологической неоднородностью разлома, соответствуют топологически плотным скоплениям фоновых сейсмических событий, названным сейсмогенными участками.

Предложенный подход применен для анализа сейсмичности Курило-Камчатской зоны субдукции, одной из наиболее активных частей взаимодействия океанической и континентальных плит. Использован региональный каталог землетрясений Камчатки за период с 1990 по 2025 гг. с представительной магнитудой полноты $M_c = 3.1$. Сейсмичность была разделена на фоновую и афтершоковую компоненты методом «ближайшего соседа». Затем методом нечеткой (fuzzy) кластеризации были выявлены пространственно плотные скопления фоновой сейсмичности, интерпретируемые как сейсмогенные участки.

Объектом исследования является переходная от континента к океану область северо-западного сегмента Тихоокеанского подвижного пояса, принадлежащая к единому Охотско-Беринговоморскому мегаблоку [Геология и полезные..., 2005]. Соответствие этого термина положению Охотской (Охотоморской) плиты не может быть полностью оправдано. Согласно утверждению Злобина Т.К. [Злобин, 2006] Охотская плита находится в пространственном ограничении Тихоокеанской плиты с востока, Североамериканской плиты с севера и Евразийской – с запада. Южную границу плиты предложено проводить через п-ов Осима и залив Утиура перпендикулярно оси субдукции [Бушенкова и др., 2025]. Однако, геологическая интерпретация данных дистанционного зондирования, представленная в работе Кожурина А.И. [Kozhurin, 2022] и результаты полевых исследований [Кожурин и др., 2023], в результате которых тефрохронологическим методом датированы слои почвенно-пирокластического чехла в долинах континентальной части Камчатки, ставит под сомнение существование западного ограничения этой плиты.

Детализируя пространственное положение объекта исследования до сейсмофокальной зоны Курило-Камчатской зоны субдукции мы ограничиваемся рассмотрением акватории Восточно-Камчатского бассейна (континентально-склоново-шельфовый) и бассейна Курило-Камчатского глубоководного желоба [Сляднев и др., 2013]. Положение этой пограничной плоскости определяется с континентальной стороны п-ова Камчатка верхней поверхностью резкого изгиба Тихоокеанской плиты, которая достаточно четко трассируется по увеличению числа и энергии землетрясений [Федотов и др., 1985; Авдейков, Палуева, 2010; Шевченко, 2025]. Ранее [Авдейков, Палуева, 2010] подобная граница использовалась для разделения землетрясений на категории принадлежности к «выше» и «ниже» интерфейса субдукции плит, однако в настоящей работе применена модель Slab 2.0 [Hayes, 2018], призванная исключить неоднозначности в определении глубин гипоцентров при классификации местоположения событий относительно зоны субдукции. Согласно предположению, Пинегиной Т.К. и Кожурина А.И. [Пинегина, Кожурин, 2023] под восточным (Кроноцкий, Шипунский, Камчатский) материковым ограничением п-ова Камчатка происходит смена знака поперечного растяжения земной коры с растяжения на сжатие, а далее к западу смена коровой сейсмичности на субдукционную (рис. 1).

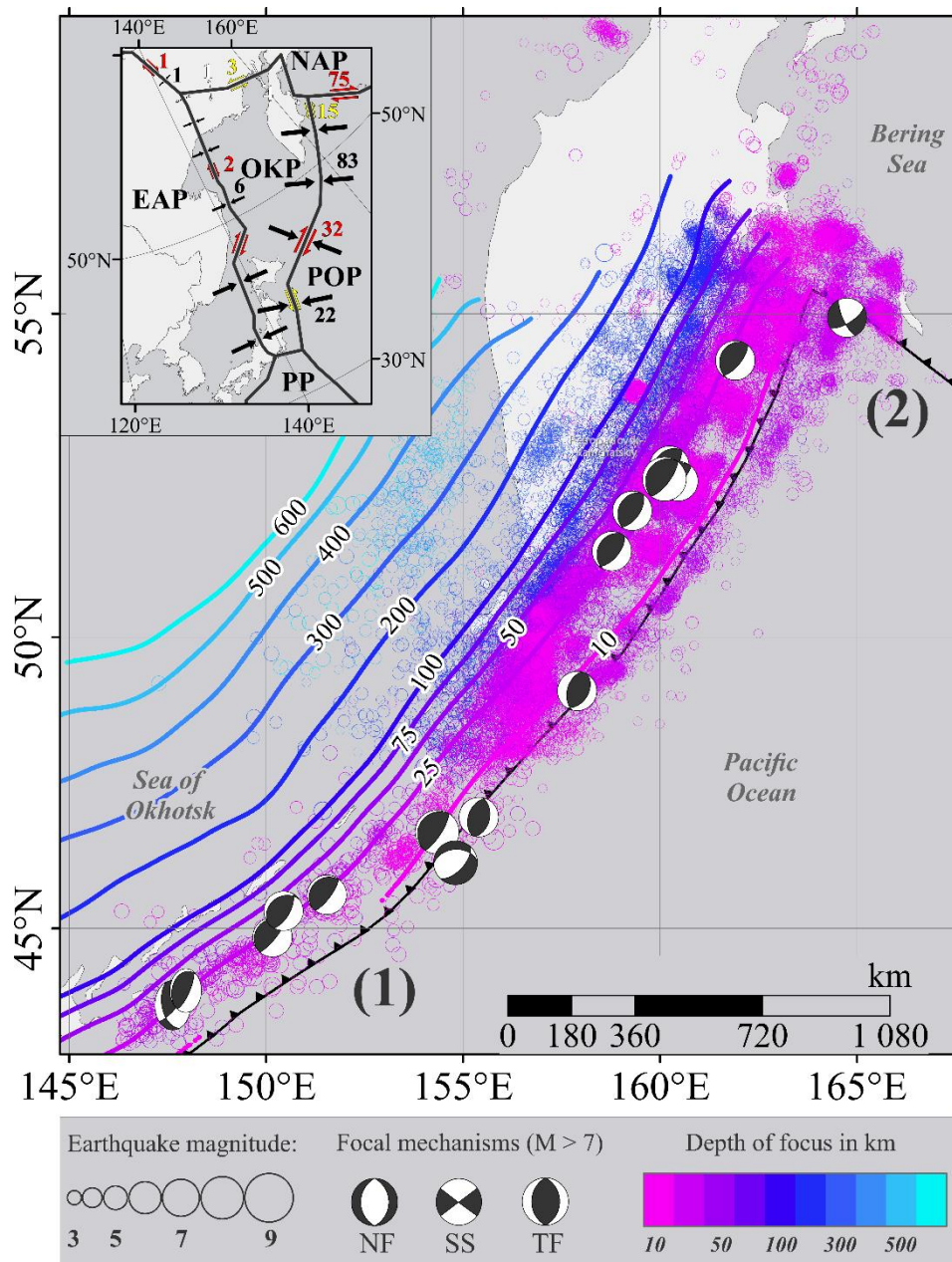


Рис. 1. Положение сейсмофокальной зоны Курило-Камчатской островной дуги. На врезке показано представление о тектонике плит в регионе исследования: POP – Тихоокеанская плита, ЕАР – Евроазиатская плита, ОКР – Охотская плита, РР – Филиппинская плита, NАР – Северо-Американская плита. Цифрами в круглых скобках обозначены глубоководные желоба: (1) – Курило-Камчатский, (2) – Алеутский

Методика проведения работ состояла в последовательности операций по декластеризации каталога сейсмических событий, а также в выделении кластеров из числа плотных множеств фоновых событий.

Для декластеризации использовалась корреляционная метрика (функции «ближайшего соседства») для каждой пары события [Zaliapin, 2013].

Для выявления неоднородности интерфейса разлома были выявлены пространственно плотные кластеры, посредством алгоритма Discrete Perfect Sets (DPS) топологической фильтрации дискретных совершенных множеств [Agayan et. al., 2014]. DPS основан на топологической фильтрации и нацелен на обнаружение множеств, заданной плотности α в конечном множестве евклидова пространства. Задача DPS – построить такой набор $W(\alpha) = \{B_1, \dots, B_n\}$, что его плотность была бы не меньше, чем α в его точках. DPS вырезает изолированные объекты (подмножество H) и объединяет оставшиеся объекты в плотные кластеры (подмножество B) в наборе W , объединенном из сейсмических фоновых событий (1):

$$W = B \cup H, B \cap H = \emptyset \quad (1)$$

DSP имеет два свободных параметра: индекс $q < 0$ для вычисления радиуса локализации и параметр $\beta \in [-1,1]$, показывающий максимальную требуемую плотность обнаруженных DPS кластеров $\alpha = \alpha(\beta, q)$. На выходе получаем набор точек $W(\alpha(\beta, q))$. Этот набор является α -плотным в каждой своей точке. Алгоритм топологической фильтрации представляет собой алгоритм неконтролируемого машинного обучения на основе нечеткой логики (2):

$$DPS(q, \beta): W \rightarrow (B_1, \dots, B_n) \quad (2)$$

Для нахождения уникального решения: должны быть выполнены два физически обоснованных условия:

- 1) характерное расстояние между плотными множествами должно соответствовать определенному расстоянию между всеми фоновыми событиями;
- 2) конфигурация плотных множеств, которая наилучшим образом представляет текущее состояние, является конфигурацией с наибольшим числом множеств.

В результате исследования в пределах Камчатского сегмента Курило-Камчатской зоны субдукции (ККЗС) обнаружены 2233 локальных плотных множеств, что составляет 44% от всей фоновой сейсмичности за период 1990-2025 гг. Для обнаружения сейсмогенных пятен был выполнен алгоритм иерархической кластеризации с метрикой Евклида [Jain et al., 1999]. Уровень дендрограммы, на котором наборы делятся на кластеры, соответствует моде попарных расстояний между фоновыми землетрясениями. Область в пространстве, где локализуются все множества плотного кластера, связана с сейсмогенным пятном (асперити).

Вдоль Камчатского сегмента ККЗС выявлено семь сейсмогенных участков (рис. 2а). Их характерные размеры L варьируются от 170 до 270 км. Эти размеры соответствуют очагам землетрясений с магнитудами от 7,8 до 8,2 [Kocharyan, Kishkina, 2021]. Анализ локализации землетрясений вдоль Камчатского сегмента ККЗС показывает, что 7 из 9 землетрясений, произошедших с января 1990 г. с магнитудами $M > 7$, локализуются внутри сейсмогенных участков. Следует отметить, что все эти события не учитывались при выявлении сейсмогенных участков, поскольку они были удалены в процессе декластеризации методом ближайшего соседа. Максимальная магнитуда фонового режима составляет 6.4.

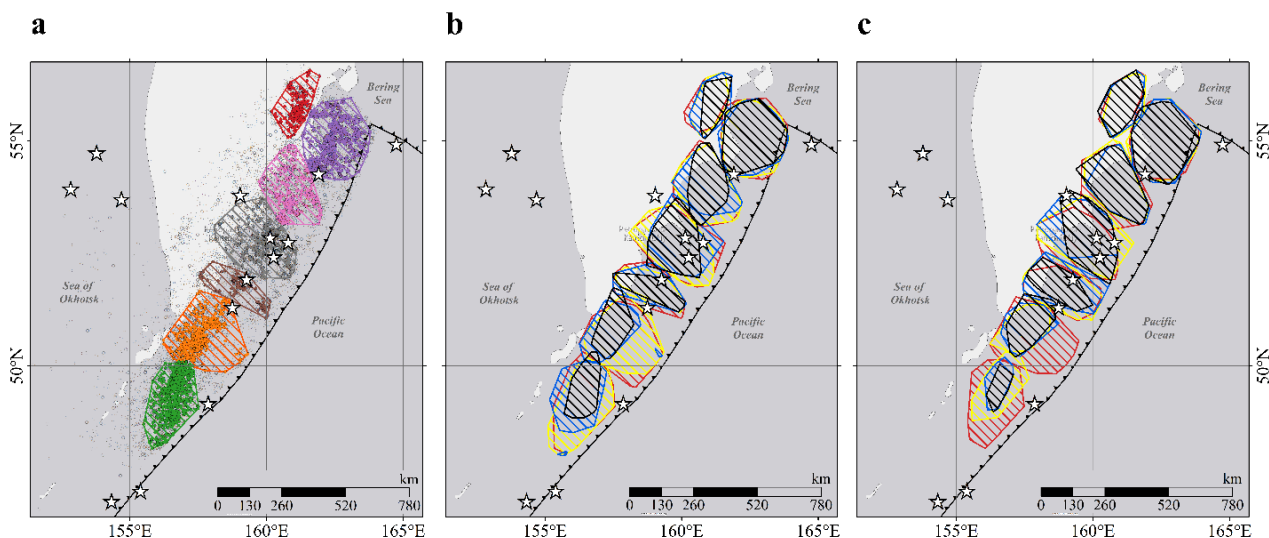


Рис. 2. Картирование сейсмогенных участков. (а) – Конфигурация сейсмогенных участков на 35-летнем интервале (полный каталог). Серые точки показывают фоновую сейсмичность (14 936 событий), цветные точки – плотные скопления фоновой сейсмичности (включают 6 593 события). Цветные контуры представляют собой сейсмогенные участки. Звездочками обозначены землетрясения с $M > 7$; (б) – Конфигурация сейсмогенных участков на 25-летнем (красный), 15-летнем (желтый), 10-летнем (синий) и 5-летнем (черный) интервалах с января 2000 г.; (с) – Конфигурация сейсмогенных участков на 25-летнем (красный), 15-летнем (желтый), 10-летнем (синий) и 5-летнем (черный) интервалах с января 1990 г

Конфигурация сейсмогенных пятен становится очевидной на временных интервалах, начиная с 5 лет (рис. 2б, с). Окончательная конфигурация пятен возникает на временных интервалах, превышающих 10 лет (фоновый каталог содержит около 1500 событий).

Когда динамика системы не может быть полностью описана системой дифференциальных уравнений или в случаях, когда физика процесса неопределенна, алгоритмы машинного обучения демонстрируют высокую эффективность [Bergen et al., 2019; Ren et al., 2020]. Таким образом, алгоритм кластеризации, предложенный в данном исследовании, является инструментом, который предоставляет информацию о неоднородности интерфейса тектонических разломов. Конфигурация тектонических неровностей и зон асейсмического скольжения контролируют процесс деформации, происходящий в зонах разломов. Морфологи неровностей интерфейса разлома является важным этапом оценки сейсмической опасности. Неровности концентрируют дефицит момента, который медленно увеличивается в межсейсмический период и в конечном итоге высвобождается посредством сильнейших землетрясений.

Литература

1. Авдейко Г.П., Палуева А.А. Сеймотектоническое районирование и геодинамика Камчатской зоны субдукции // Вулканология и сейсмология. 2011. №1. С. 3–18.
2. Бушенкова Н.А., Ступина Т.А., Кучай О.А. Локализация южной границы Охотской плиты на основе комплекса сейсмических характеристик // Геология и геофизика. 2025. Т.66. №6. С. 723–733.
3. Геология и полезные ископаемые России. Арктические и дальневосточные моря. Кн. 2. Дальневосточные моря, их континентальное и островное обрамление. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. 2005. Т.5. 303 с.
4. Злобин Т.К. Охотская литосферная плита и модель эволюции системы «окраинное море – островная дуга – глубоководный желоб» // Вестник ДВО. 2006. №1. С. 26–32.
5. Кожурин А.И., Пинегина Т.К., Пономарева В.В. Продольные сдвиги в островной дуге при нормальном поддвиге океанической плиты: пример Камчатки // Тихоокеанская геология. 2023. Т.42. №5. С. 92–104.
6. Сляднев Б.И., Боровцов А.К., Сидоренко В.И., Сапожникова Л.П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Курильская. Лист О-58 – Усть-Камчатск. Объяснительная записка. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2013. 256 с.+ 9 вкл.
7. Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С. Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и связь с вулканизмом) // Вулканология и сейсмология. 1985. №4. С. 91–107.
8. Шевченко Ю.В. Некоторые особенности морфологии сейсмофокальной зоны Камчатского региона // Геосистемы переходных зон. 2025. Т.9. №1. С. 5–21.
9. Agayan S.M., Bogoutdinov S.R., Dobrovolsky M.N. Discrete Perfect Sets and Their Application in Cluster Analysis // Cybern. Syst. Anal. 2014. Vol.50. P. 176–190.
10. Bergen, K.J., Johnson, P.A., de Hoop, M.V., et al. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience // Science. 2019. Vol.363 (6433). Art. No eaau0323.
11. Hayes G.P. et al. Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model // Science. 2018. Vol.362. P. 58–61.
12. Jain A.K., Murty M.N., Flynn P.J. Data clustering: a review. // ACM Comput. Surv., 1999. Vol.31. No.3. P. 264–323.
13. Kocharyan G.G., Kishkina S.B. The Physical Mesomechanics of the Earthquake Source. Phys. Mesomech. 2021. Vol.24. P. 343–356.
14. Kozhurin A. Active faults in Sakhalin and North of the Sea of Okhotsk: Does the Okhotsk plate really exist? // Journal of Asian Earth Sciences. 2022. Vol.230. Art. 105219.
15. Ren C.X., Hulbert C., Johnson P.A., Rouet-Leduc B. Machine learning and fault rupture: a review // Adv. Geophys. 2020. Vol.61. P. 57–107.
16. Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in Southern California I: Identification and stability. // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2013. Vol.118 (6). P. 2847–2864.

СТРУКТУРНЫЙ ФАКТОР ПРИ ПРОГНОЗЕ ОПАСНОСТИ ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ УГЛЯ И ГАЗА

Пашичев Б. Н.¹, Малинникова О. Н.¹, Ульянова Е. В.¹

¹ – *Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Россия; borisnik-pa@yandex.ru*

Проблема кинетики горных процессов в последние годы приобрела особую актуальность в связи с разработкой угольных месторождений на больших глубинах. Перед учёными, занимающимися изучением угля, поведением угольных пластов в случаях склонности этих пластов к опасным проявлениям таким как выбросы, самовозгорание, высокая метаносность, разная скорость выхода метана из угля, при его разрушении, стоит вопрос, что в большей степени влияет на эти проявления.

Исследование проводилось на пробах с шахт «Им. С.М. Кирова» и «Им. А.Д. Рубана» Кузнецкого угольного бассейна. В качестве параметра, характеризующего фактическое состояние угля в местах отбора проб, использовались данные газоносности в призабойной зоне пласта. Наиболее достоверная информация о природной газоносности и газоносности частично дегазированного угля в призабойной зоне пласта в непосредственной близости от его обнажения может быть получена при измерениях этих параметров в отрабатываемых очистных и проходческих забоях. Сложный характер распределения метана в углепородном массиве, связанный с природными особенностями месторождений, даёт приближенное представление о пространственном распределении метанообильности отрабатываемого блока угольного пласта.

Определение газоносности разрабатываемых угольных пластов проводилось по разработанной в ИПКОН РАН методике определения газоносности, которая легла в основу Руководства по безопасности, утвержденного Ростехнадзором [Руководство ..., 2017]. Пробы угля отбираются в герметичные пластиковые контейнеры и/или в керноотборники. Методика предусматривает определение объема полного газовыделения из угольного керна в несколько этапов: измерения объемов газа, выделяющегося из угольного керна непосредственно в шахте (с учетом рассчитанного объема газа, “потерянного” при выбуривании керна) – V_1 ; объемы газа, выделившегося из керна в лаборатории при атмосферном давлении – V_2 ; объемы остаточного газа, выделившегося из пробы керна при измельчении в герметичной мельнице до крупности 0.2 мм – V_3 . Затем при их суммировании получили $Q_{\text{общее}}$ – газоносность в точке отбора. Установлено, что несмотря на то, что призабойная зона пласта активно дегазируется, уголь содержит еще довольно много метана.

Указанные угольные шахты выбраны потому, что угольные пласты шахты им. А.Д. Рубана обладают наименьшей, а пласты шахты им. С.М. Кирова – наибольшей газоносностью призабойной зоны из общего количества обследованных угольных пластов АО “СУЭК-Кузбасс”.

Вопросы связи структурных особенностей углей с их свойствами, такими как нарушенность, проницаемость, прочностные характеристики, способность к газоотдаче, выбросоопасность угольных пластов и др. рассматриваются в работах многих учёных. Начиная вначале с описания макроуровня, в настоящее время исследования структуры угля и определение её влияния на сорбционные физико-механические и другие свойства ведутся на микроуровне. Однако, как отмечают многие исследователи, мы ещё недостаточно знаем о влиянии структуры угля на характер протекающих в нём процессов, нужно искать и применять новые методы исследования и описания особенностей строения угля на микроуровне и их иерархической связи со свойствами и состоянием углей на макроуровне.

Устоявшимся считается взгляд на угольную структуру как на двухкомпонентную систему, состоящую из графитоподобных областей (ароматики) и сложной смеси углеводородов нерегулярного строения (алифатики) разной степени упорядоченности. Однако, при этом мнения исследователей расходятся как в оценке характеристик графитоподобных областей, так и во взглядах на пространственную ориентацию упорядоченных областей в алифатической части структуры. Следует учитывать, что физические свойства аморфных углеродных материалов находятся в сильной зависимости от состояния атомных орбиталей углеродных атомов, присутствует двойная связь ($-C=C-C-C-$) или только одинарные связи ($-C-C-C-C-$).

Поэтому, при исследованиях, изучая макросвойства углей, необходимо учитывать, что уголь – это полифазная структура, состоящая из разного сочетания модификаций углерода. При разных сочетаниях этих модификаций, угли одной марки даже в пределах пласта могут отличаться иерархией структуры, сорбционными характеристиками (содержанием воды, метана и кинетикой десорбции, способности к проявлению опасных явлений).

В данной работе мы представляем исследование структуры углей примерно одних марок, но имеющих разное содержание метана и разную склонность к проявлению опасных явлений в пласте, проведенные с использованием метода электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). ЭПР-метод является одним из нескольких существующих информативных методов для исследования свойств и структуры угля.

Неоднородность структуры каменных углей и их петрографических составляющих обуславливает существование парамагнитных центров (ПМЦ), формируемых разными межмолекулярными и внутримолекулярными связями угольного вещества [Русьянова, 2003]. Спектры ЭПР каменных углей состоят, как минимум, из двух линий: линия 1 от ненасыщенных химических связей в алифатической части угля, образующие свободные валентности, и линия 2 от систем сопряжения, которые входят как в алифатическую, так и в ароматическую часть угля [Захаров и др., 2021]. Исследования ЭПР были проведены на спектрометре BRUKER EMX 6/1 с использованием экспериментальной базы ЦКП “Нанохимия и наноматериалы” МГУ в рамках Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова.

В результате исследований установлено, что у углей с меньшей газоносностью меньше общее количество ПМЦ и из них преобладают от сопряженных систем, а у углей с большей, соответственно больше общее число ПМЦ и из них преобладают от ненасыщенных химических связей в алифатической части. На основании чего предлагается схематическая модель структуры угля (рис. 1).

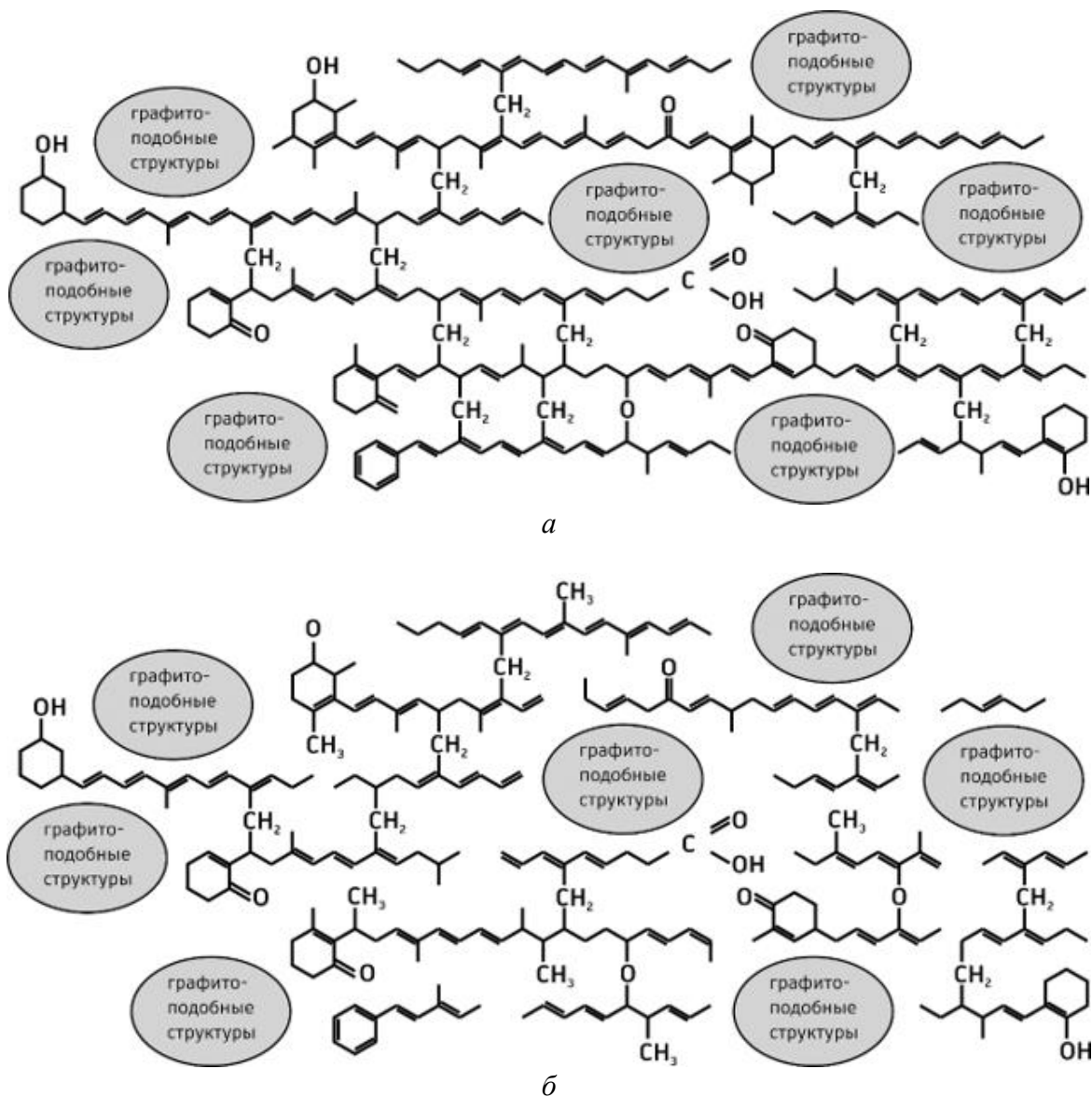


Рис. 1. Схематическая модель структуры углей одной стадии метаморфизма: (а) – с более упорядоченной структура, вклад от сопряженных систем больше, (б) – более нарушенная структура, больше вклад от оборванных связей

Для количественной оценки нарушенной угольной структуры мы прибегли к электронно-микроскопическим исследованиям поверхности образцов углей, проведенным на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6610LV. Для получения наиболее полной и достоверной информации о структуре углей при их исследовании под микроскопом из каждой пробы угля отбирались кусочки, наиболее полно ее представляющие, не менее 3-4 образцов из пробы. На каждом образце делалась серия снимков (не менее 10) в разных точках, что позволило получить 30-40 снимков для каждой пробы.

Поскольку разброс значений “энтропия – сложность” по поверхности одного цифрового изображения достаточно велик, для дальнейшего анализа рассчитывается его среднее значение для каждого изображения. Полученные точки, нанесенные на диаграммы “энтропия – сложность”, характеризуют распределение структурных неоднородностей в образце. На рис. 2 приведены рассчитанные значения энтропии и сложности для групп проб углей, отобранных из указанных шахт. Приведенные пробы углей выбраны потому, что угольные пласты шахты им. А. Д. Рубана обладают наименьшей, а пласты шахты им. С.М. Кирова – наибольшей газоносностью призабойной зоны из общего количества обследованных угольных пластов АО “СУЭК-Кузбасс”.

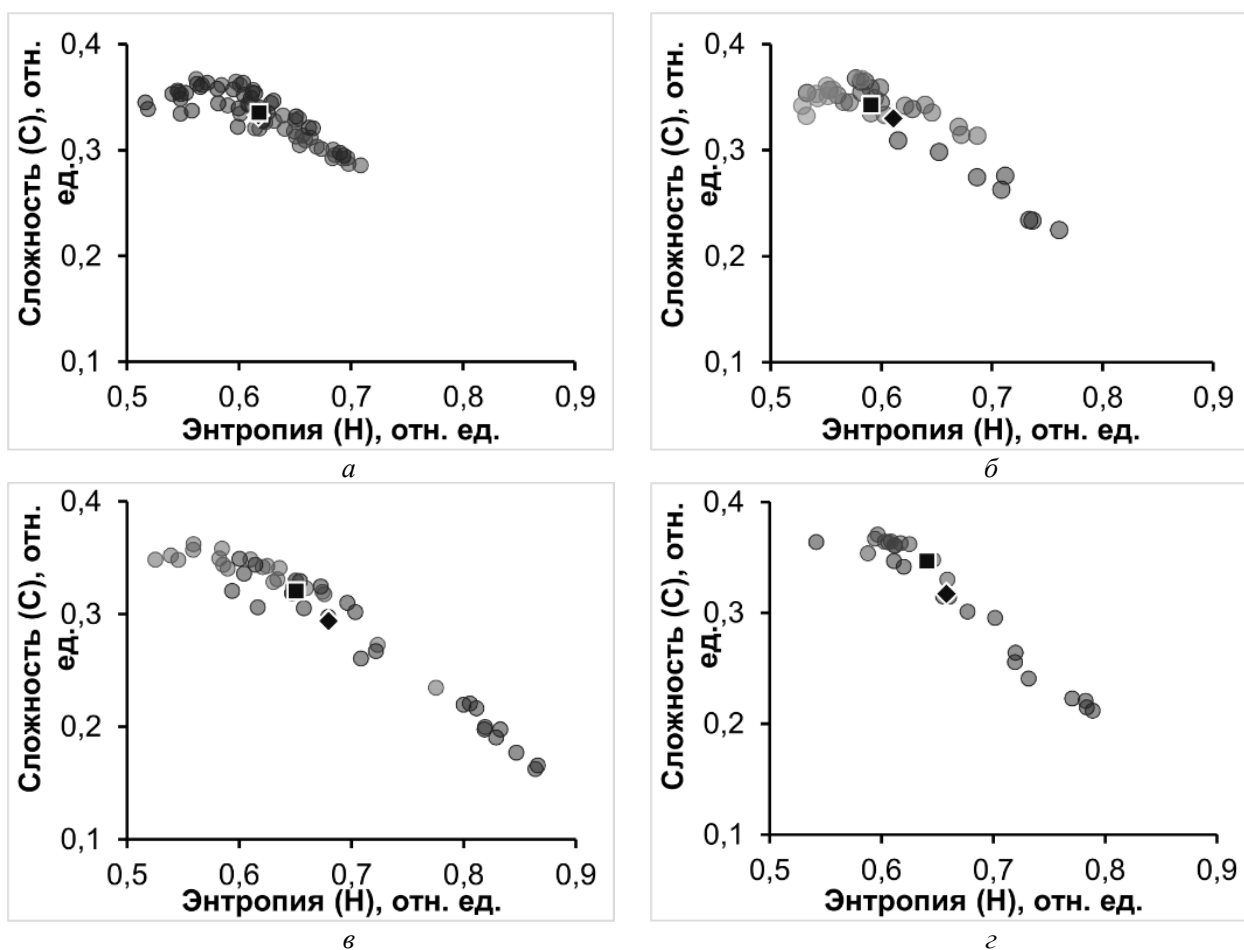


Рис. 2. Диаграммы распределения значений “энтропия–сложность” для серий снимков поверхности образцов угля: (а, б) – пробы 1, 2 из пласта “Полысаевский-2” шахты “Им. А.Д. Рубана” 1 - $Q = 3,73 \text{ м}^3/\text{т}$ и 2 - $Q = 1,30 \text{ м}^3/\text{т}$; (в, г) – пробы 3, 4 из пласта “Поленовский” шахты “Им. С.М. Кирова” 3 - $Q = 11,26 \text{ м}^3/\text{т}$ и 4 - $Q = 11,27 \text{ м}^3/\text{т}$

Из приведенных диаграмм (рис. 2) видно, что угли шахты им. А.Д. Рубана с меньшими значениями газоносности призабойной зоны пласта (в среднем 1-3 $\text{м}^3/\text{т}$) обладают более упорядоченной микроструктурой. Наибольшее значение энтропии не опускается ниже 0.72 отн. ед. Среднее арифметическое значение и медиана совпадают и равны 0.62 отн. ед. Угли шахты им. С.М. Кирова с высокой газоносностью в среднем 11 $\text{м}^3/\text{т}$, показывают более хаотичную структуру, с максимальными значениями энтропии 0.88 отн. ед. Среднее арифметическое значение равно 0.68 отн. ед. Разброс значений H и C для углей шахты им. А.Д. Рубана также значительно меньше, чем для углей шахты им. С.М. Кирова. Это свидетельствует о том, что угли с меньшей газоносностью структурно более упорядочены.

Выводы. Проведенные исследования о роли структурного фактора в вопросе склонности угольных пластов Кузнецкого угольного бассейна к опасным явлениям показали важность учета его влияния. В работе анализировались особенности структуры каменных углей на микронном уровне для различных групп углей. Используются различные методики: определения газоносности, ЭПР-спектроскопии и анализа цифровых снимков поверхности угольных проб с помощью диаграмм информационных мер энтропии и сложности. Показано существенное различие в поведении распределения значений мер для проб из участков пластов с различной газоносностью и соответственно при её высоких значениях склонных к опасным явлениям. Применение методики, учитывающей структурный фактор, позволит повысить достоверность данных при прогнозе опасности внезапных выбросов угля и газа.

Литература

1. *Захаров В.Н., Ульянова Е.В., Малинникова О.Н., Пашичев Б.Н.* Влияние петрографического состава угля на его способность к удержанию метана // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. №12. С. 88–98.
2. Руководство по безопасности “Рекомендации по определению газоносности угольных пластов” – М.: ЗАО НТЦ ПБ. 2017. Сер.5. Вып.48. 44 с.
3. *Русьянова Н.Д.* Углехимия.
4. М.: Наука. 2003. 317 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ И ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ЗАДАЧ СЕЙСМОТЕКТОНИКИ

Сенцов А. А.¹, Агибалов А. О.^{1,2}

¹ – *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; alekssencov@yandex.ru*

² – *Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Появление новых исходных данных и средств их обработки обусловило расширение возможностей геоморфологических и тектонофизических методов для решения сейсмоструктурных задач. Оно связано с созданием более точных по сравнению с ранее разработанными цифровых моделей рельефа (ЦМР) и применением современных автоматизированных алгоритмов их обработки, а также совершенствованием программного обеспечения для проведения компьютерного геодинамического моделирования. Отдельного внимания заслуживает ЦМР FABDEM V1–2 с горизонтальным разрешением 1 угловая секунда (~30 м) и средней ошибкой вертикальной точности на участках с уклоном $\leq 35^\circ$ близкой к 0 м, а при увеличении крутизны склонов до 45° – около 2-3 м [Смирнов, Кочнева, 2024]. По этой ЦМР возможно более точно выделить предполагаемые активные разрывные нарушения структурно-геоморфологическим методом Н.П. Костенко [1999] и рассчитать значения морфометрических параметров рельефа, информативных для понимания направленности и интенсивности неотектонических движений.

Несмотря на то, что в целом геоморфологические и тектонофизические методы имеют вспомогательное значение при решении сейсмоструктурных задач по сравнению с инструментальными сейсмическими наблюдениями, палео- и археосейсмологическими исследованиями, они позволяют получить интересные и практически значимые результаты, востребованные для выделения сейсмогенерирующих разломов и оконтуривания зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ). Отметим также, что проведение морфометрических исследований рельефа и компьютерного геодинамического моделирования не требует значительных материальных затрат, поскольку основано на использовании открытых данных.

В ряде работ, например [Шебакин и др., 2024], обоснована актуальность совершенствования технологии создания линеаментно-доменно-фокальных моделей, положенных в основу карт общего сейсмического районирования России. Она связана в том числе с необходимостью формализации методики выделения их площадных элементов. На примере нескольких регионов (Большого Кавказа, Сахалина, Балтийского щита, Воронежской антеклизы, Алтае-Саянской области, Республики Союз Мьянма) нами показана возможность оконтуривания сейсмоактивных участков по положительным аномалиям морфометрических параметров рельефа, обработанных с использованием кластерного анализа, аппарата нечеткой логики или метода равнозначных градаций [Копылов, 2019]. Наиболее сложным и недостаточно проработанным в методическом отношении вопросом остается выбор исходных морфометрических характеристик. На основе статистического анализа взаимосвязи современной сейсмичности и рельефа для Большого Кавказа выбраны схемы разности базисных поверхностей 2–3 и 4–5 порядков, дисперсии глубины вертикального расчленения рельефа, асимметрии высот [Собисевич и др., 2024]; для Сахалина – плотности линеаментов, асимметрии высот [Sobisevich et al., 2024]; для Балтийского щита – асимметрии высот, крутизны склонов, разности базисных поверхностей разных порядков, средних высот; для Воронежской антеклизы – глубины вертикального расчленения, крутизны склонов, плотности ортогональных линий, модуля кривизны рельефа [Агибалов и др., 2021]; для Алтае-Саянской области – глубины вертикального расчленения, средних высот, разности гипсометрической и базисной поверхностей 6 порядка [Sobisevich et al., 2025]; для западной части Мьянмы – асимметрии высот, плотности водотоков, а для восточной – разности гипсометрической поверхности и базисной 2 порядка, разности базисных поверхностей 1–2 и 3–4 порядков [Сенцов и др., 2025]. Таким образом, набор наиболее информативных для выделения сейсмоактивных участков морфометрических параметров рельефа существенно различается в разных регионах, однако в большинстве случаев к нему относятся глубина вертикального расчленения, асимметрия высот и разности базисных поверхностей. Обработка этих морфометрических характеристик методами кластерного анализа, равнозначных градаций или γ -оператором нечеткой логики позволяет построить схемы интегрального показателя, характеризующего степень сейсмоструктурной активности.

Компьютерное геодинамическое моделирование дополняет результаты анализа рельефа и направлено на оценку относительных величин современных напряжений. Построение упругой модели предполагает использование высот рельефа и сетки активных разломов, по которым происходят перемещения блоков. Приняты допущения о том, что эти подвижки продолжаются до полной релаксации напряжений, а все разломы вертикальны и не пересекаются друг с другом. На примере упомянутых регионов области повышенных значений интегрального морфометрического показателя и относительной величины горизонтальных напряжений проинтерпретированы как зоны ВОЗ. Они занимают относительно небольшую площадь, и в их пределах расположена значительная часть эпицентров современных землетрясений, в том числе высокомагнитудных.

Таким образом, результаты комплексного морфометрического анализа рельефа и компьютерного геодинамического моделирования применимы для выделения зон ВОЗ. По нашему мнению, развитие предложенного методического подхода предполагает расширение представлений о взаимосвязи сейсмичности и рельефа, для того чтобы оптимизировать порядок выбора наиболее информативных морфометрических параметров в качестве исходных данных. Это перспективное направление можно назвать объяснительной морфометрией рельефа [Симонов, 1999]. Другим важным направлением представляется совершенствование алгоритмов компьютерного моделирования с целью более точной и достоверной характеристики современного поля напряжений.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН и НИИР «Моделирование новейших геодинамических процессов, влияющих на сейсмичность и флюидную проницаемость осадочных толщ» (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Литература

1. Агibalов А.О., Зайцев В.А., Сенцов А.А. Новые возможности геоморфологических и тектонофизических методов для анализа сейсмичности на примере Северо-Западного Кавказа и Воронежской антеклизы // Наука и технологические разработки. 2021. Т.100. №3. С. 40–52.
2. Копылов И.С. Морфонеотектоническая система оценки геодинамической активности. – Пермь: Perm University Press. 2019. 132 с.
3. Костенко Н.П. Геоморфология. М.: Издательство Московского университета. 1999. 379 с.
4. Сенцов А.А., Собисевич А.Л., Агibalов А.О., Славина Л.Б., Котов А.Н. Выделение зон возникновения очагов коровых землетрясений Республики Союз Мьянма: новый методический подход на базе анализа рельефа и компьютерного геодинамического моделирования // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2025. Т.525. №1. С. 135–145.
5. Симонов Ю.Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС. 1999. 250 с.
6. Смирнов Е.А., Кочнева Д.А. Оценка точности глобальной цифровой модели рельефа FABDEM для горных территорий (на примере Макажойской котловины, Чеченская Республика) // Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2024. Вып.9. С. 74–78.
7. Собисевич А.Л., Стеблов Г.М., Агibalов А.О., Алешин И.М., Балашов Г.Р., Кондратов А.Д., Makeev В.М., Передерин В.П., Передерин Ф.В., Розенберг Н.К., Сенцов А.А., Холодков К.И., Фадеева К.В. Выделение зон возможных очагов землетрясений в областях новейшего тектогенеза на основе геолого-геоморфологических факторов и инструментов нечеткой логики (на примере Большого Кавказа) // Вулканология и сейсмология. 2024. №5. С. 53–66.
8. Шебалин П.Н., Тихоцкий С.А., Коваленко А.А. О совершенствовании подходов к сокращению ущерба от землетрясений // Вестник Российской академии наук. 2024. Т.94. №10. С. 900–909.
9. Sobisevich A.L., Steblov G.M., Agibalov A.O., Aleshin I.M., 4, Balashov G.R., Kondratov A.D., Makeev V.M., Perederin V.P., Perederin F.V., Sentsov A.A., Kholodkov K.I. Seismic Domain Identification Algorithm Using Fuzzy Logic Methods With Combined Geological and Geomorphological Data for the Case of Sakhalin Island // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Vol.24. No.2.
10. Sobisevich A.L., Steblov G.M., Sentsov A.A., Deev E.V., Eppelbaum L.V., Agibalov A.O., Aleshin I.M., Balashov G.R., Kamenev O.T., Kotov A.N., Makeev V.M., Perederin V.P., Perederin F.V., Rosenberg N.K., Kholodkov K.I., Safronov O.V. Identification of Potential Earthquake Foci Locations Zones in the Altai-Sayan Mountain Region: A New Approach Using Morphometric Terrain Analysis and Geodynamic Modeling // Natural Hazards. 2025. Vol.121. P. 19863–19887.

ЛИНЕАМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ПО ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ КАНАЛОВ МИГРАЦИИ МЕТАНА

Силевич А. С.¹

¹ – *Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Россия; silavi23@yandex.ru*

Введение. При подземной разработке угольных пластов происходит частичная разгрузка всех расположенных выше пластов и пропластков, образуются зоны повышенной проницаемости или пустотности, в которых аккумулируется метан, выделяющийся, как из разрабатываемого пласта, так и из всех вышерасположенных пластов, попадающих в зону частичной разгрузки [Ходырев, 2024]. То есть, в случае подработки свиты пластов с высокой газоносностью выше отработанного пласта может образоваться высоконапорный техногенный газовый коллектор. Оценки параметров таких коллекторов приведены в работе [Ходырев, 2024]. Там же отмечается, что «специфическая конфигурация зон повышенной газоносности и направленность градиентов давлений в них позволяет классифицировать эти объекты, как потенциально высоко опасные участки по прорывам метана на земную поверхность». Поэтому актуальной задачей промышленной безопасности при подземной разработке угольных месторождений остаётся прогнозирование зон деформации, путей миграции метана к земной поверхности и мест возможного выхода метана на поверхность.

Классические подходы, основанные на анализе геомеханических моделей развития мульды оседания, отражающих техногенную деформацию массива, не позволяет предсказать места возможного выхода метана на дневную поверхность, поскольку практика показывает, что газовые проявления зачастую фиксируются не над центром мульды, а вблизи природных тектонических нарушений и зон субповерхностной трещиноватости, где формируются естественные каналы восходящей миграции газа.

Это ставит вопрос о необходимости включения в оценку рисков не только деформационного поля, но и структурно-геологической компоненты среды. Линеаментный анализ дистанционных материалов широко применяется в задачах выявления тектонических зон активизации, зон разрывных нарушений и геодинамических неоднородностей [Златопольский, 2008]. Применение этого метода для оценки метаноопасности на подработанных территориях является новым направлением, позволяющим дополнить классический геомеханический подход выделением природных флюидопроводящих зон. В данной работе был выполнен анализ цифровой модели рельефа (ЦМР), полученной по данным аэрофотосъёмки с БПЛА, с целью выявления зон линейных структур, контролирующей восходящую миграцию метана на территории влияния отработки пласта Болдыревский шахты им. С.М. Кирова.

Материалы и методы. Для анализа использованы аэрофотоданные за 2019 и 2023 гг., что позволило оценить изменение структуры поверхности в динамике. 2019 год фиксирует состояние до активной подработки пласта, 2023 – после периода интенсивного газоопасного проявления и расселения жилых домов. Материалы были обработаны с формированием ортофотоплана и цифровой модели рельефа высокого разрешения. Линеаментный анализ выполнен с использованием комплекса LESSA [Златопольский, 2008]. Автоматизированным способом выделялись вытянутые линейные элементы («штрихи») с последующей фильтрацией по длине: исключены элементы менее 50 м для сокращения шумов. Далее формировались карты плотности линеаментов по доминирующим ориентациям в ГИС-среде. Особое внимание уделено субширотным (восточным) ориентациям, характерным для природных разрывных структур на данном участке. Объект исследования включает область влияния отработки пласта Болдыревский.

Результаты. На данным 2023 года выявлена зона повышенной плотности субширотных линеаментов, пространственно совпадающая с выходом на поверхность Восточно-Камышанского взброса (рис. 1) Площадь зоны повышенной плотности составляет приблизительно 100-150 м по ширине. Таким образом, максимальное газопроявление фиксируется не непосредственно над контуром лавы, а севернее. Мы предполагаем, что это связано с тем, что при подземных горных работах верхние пласты разупрочняются, и метан начинает активно мигрировать по природным коллекторам. В данном случае – по Верхне-Камышанскому взбросу.

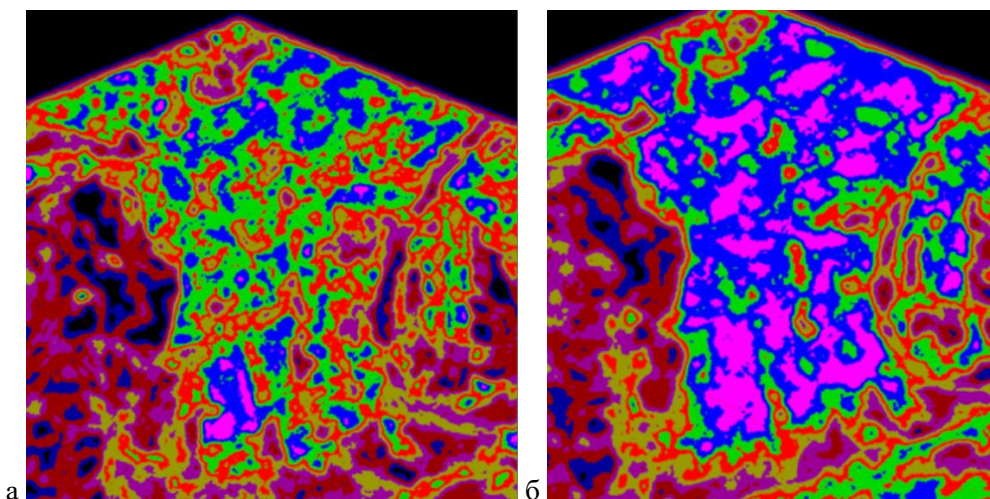


Рис. 1. Сравнение плотности линеаментов восточного направления: (а) – 2019 год, (б) – 2023 год

Полученные результаты показывают, что природные разрывные нарушения играют ключевую роль в формировании каналов восходящей миграции метана. Линеаментный анализ по данным ЦМР позволяет выявить потенциально опасные зоны ещё до проявления визуальных деформаций поверхности. Это делает методику перспективной для предварительной диагностики риска при планировании горных работ. Ограничения метода включают зависимость точности выделения линеаментов от качества исходных снимков, сезонности съёмки, растительного покрова и антропогенных объектов. Тем не менее в условиях, когда прямые натурные газовые измерения ограничены или невозможны – использование линеаментного анализа в комплексе с классическими геомеханическими моделями представляется обоснованным и целесообразным. Следующее направление развития – совмещение линеаментной картины с данными интерферометрии, что позволит получить представление о связях между нарушениями и микродеформациями.

Заключение. Линеаментный анализ по цифровой модели рельефа, полученной на основе данных аэрофотосъёмки БПЛА, подтвердил возможность выявления природных каналов миграции метана на территории влияния подработки. Максимальная плотность субширотных линеаментов совпала с зоной Восточно-Камышанского взброса, что соответствует зонам повышенной метаноносности и фактическим газоопасным проявлениям. Данный метод может использоваться как дополнительный инструмент при оценке риска, а также на стадии планирования горных работ для раннего определения потенциально опасных участков.

Литература

1. *Златопольский А.А.* Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т.1. С. 102–112.
2. *Золотых С.С.* Заблаговременная дегазация угольных пластов как фактор повышения безопасности на шахтах Кузбасса // Горная промышленность. 2019. №5. С. 18–22.
3. *Фёдоров Е.В., Кулибаба С.Б.* Исследование влияния предварительной наработки пласта на метановыделение // Энергетика и рациональное природопользование. 2023. №2. С. 431–442.
4. *Ходырев Е.Д.* К вопросу о формировании зон, опасных по прорывам метана на земную поверхность, при затоплении угольных предприятий // Труды РАНМИ. 2024. №3(41). Т.2. С. 47–56.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РААХЕ-ЛАДОЖСКОЙ ЗОНЫ В СЕВЕРНОМ ПРИЛАДОЖЬЕ

Таран Я. В.¹, Алёшин И. М.^{1,2}, Холодков К. И.^{1,2}, Передерин Ф. В.¹

¹ – *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия; taran@ifz.ru*

² – *Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия*

Территория Северного Приладожья представляет собой сочленение различных по составу и генезису тектонических структур. Юго-восточная часть относится к поздне-палеопротерозойскому Свекофенскому орогену, содержащему сланцы и гнейсы гранулитовой и амфиболитовой фаций, с присутствием сульфидов и углерода. Северо-западная – к архейскому Карельскому кратону, выходящим на поверхность породам фундамента (гнейсы, диорито-гнейсы, гранито-гнейсы). Промежуточная шовная зона носит название Раахе Ладожской (Ладожско-Ботнической) и прослеживается на значительное расстояние на север Фенноскандии на территории Финляндии [Мицц, 2018]. В пределах Раахе-Ладожской зоны присутствуют месторождения медных, никелевых и полиметаллических руд. В разуплотнениях разломных зон также могут встречаться скопления флюидов. Таким образом, структурно-вещественное строение региона должно ярко проявляться в аномалиях различных полей и параметров, а комплексное геофизическое моделирование позволит уточнить имеющиеся представления о тектоническом строении и схемах геодинамической эволюции региона. Геофизическая изученность Северного Приладожья на сегодняшний день довольно обширна и основную зону интересов исследователей представляют преимущественно глубинные исследования.

Раахе-Ладожскую зону пересекает сейсмический профиль МОВЗ (метода обменных волн землетрясений) Гдов-Сосновый Бор – Зелёная Роща – Сортавала – Спасская Губа общей длиной 540 км. В 1980-2000-х годах ГПП «Невскгеология» и другими организациями вдоль него проводились многочисленные исследования, результаты которых были систематизированы и описаны в [Свириденко, 2017]. Полученный разрез части профиля в Северном Приладожье позволил авторам наметить структуры надвига верхних коровых отложений Свекофенских образований на Карельский кратон, который произошел в процессе аккреции Свекофенских островных дуг. Нижняя же часть Свекофенской островной дуги, сложенная фактически породами океанической коры, как считают авторы исследований, субдуцирует в мантию под Карельский кратон.

Согласно результатам интерпретации данного профиля, совместно с геоэлектрическими АМТЗ исследованиями 1980-90-х годов (рис. 1а) [Ковтун, 2011] в Северном Приладожье выделяется Североладожский блок протерозойской коры, ограниченный с востока Приозерской разломной зоной и с запада Рускеальской (Сортавальской). Следом на запад – Сортавальский блок. Ещё западнее – Янисьярвинская разломная зона, которая является ключевой границей между Свекофенским орогеном и Карельским кратоном. Помимо указанных разломных зон также важным структурным элементом Северного Приладожья является Мейреская зона надвига, по которой разделяются Северный и Южный домены региона, эволюция которых в раннем протерозое имеет существенные отличия [Ладожская..., 2020].

Многочисленные геофизические исследования российских и европейских учёных в Фенноскандии и примыкающих областях, позволили построить множество 1D и 2D моделей проводимостей верхней мантии изучаемого региона. Их результаты были систематизированы и интерпретированы группой ученых под руководством Т. Коржа, получившими послойную модель суммарной интегральной проводимости коры Фенноскандии SMAP. Согласно полученным картам, Раахе-Ладожская шовная зона между архейской и протерозойской корой маркируется коровыми проводниками [Korja et al., 2002].

В пределах Северного Приладожья данная зона повышенной проводимости известна как Ладожская аномалия электропроводности (ЛАЭ). Первоначально ЛАЭ была обнаружена методом МВЗ в конце семидесятых годов и описана А.А. Ковтун и И.И. Рокитянским. Для более детального исследования данной аномалии позднее были выполнены АМТ зондирования вдоль профиля Выборг-Суоярви (рис. 2), по результатам которых геометрия аномалии определялась как крутопадающее тело с двумя главными проводящими ядрами, расположенными на расстоянии 80 км друг от друга и приуроченными к разломным структурам (рис. 1а).

Современный этап данных исследований включал в себя серию МТ-МВ зондирований вдоль того же профиля Выборг-Суоярви-2. В 2013-15 гг. были проведены 43 суточных (рядовых) зондирований станциями MTU «Phoenix Geophysics» и 9 трёхсуточных (глубинных) станциями

LEM1. Общая протяженность профиля составляет около 200 км, с шагом между 43 рядовыми точками 2-8 км и 20-25 км между точками глубинных зондирований.

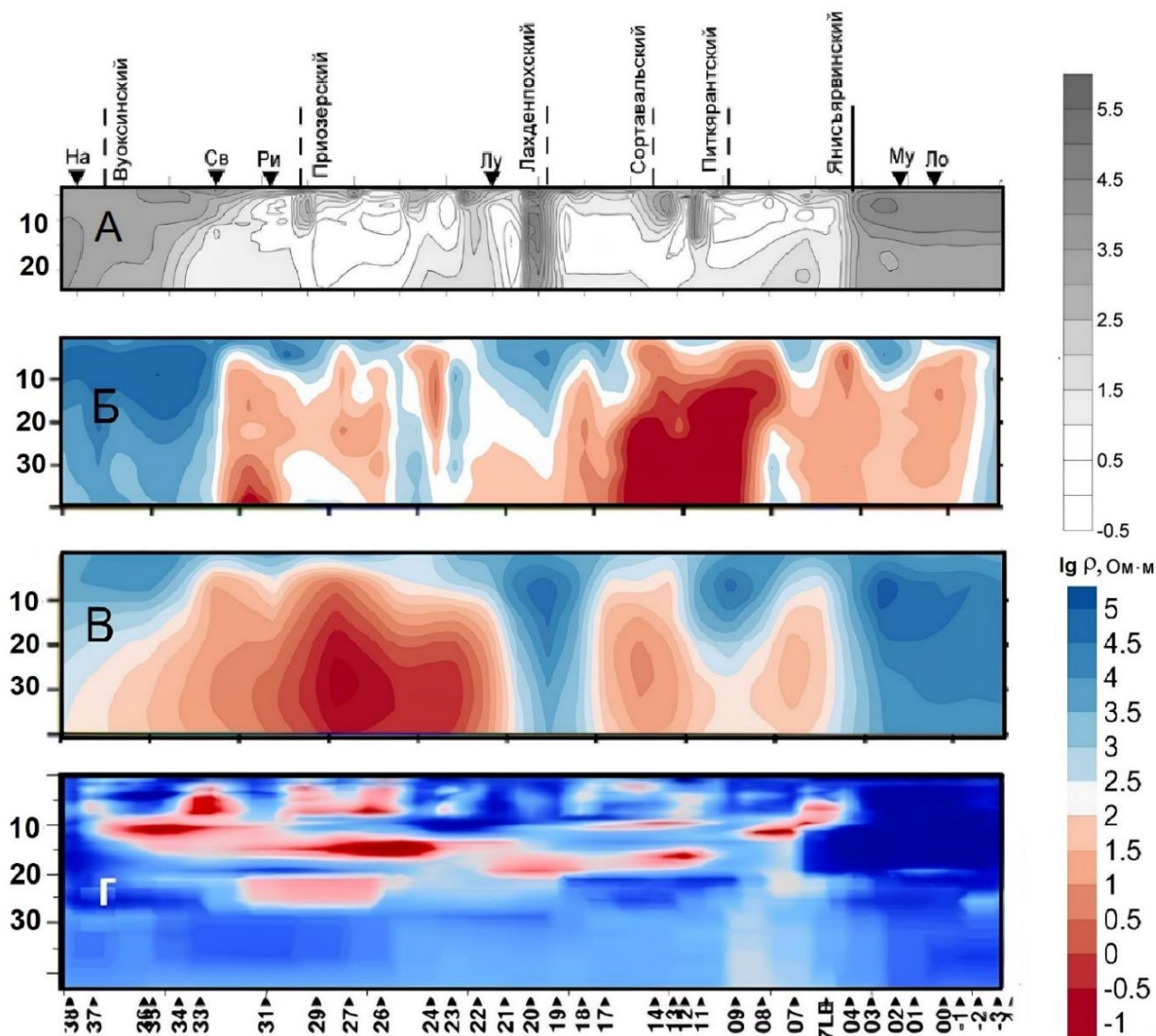


Рис. 1. Сопоставление различных результатов двумерной инверсии АМТ и МТ/МВ данных профиля Выборг-Суоярви-2. Положение тектонических разломов нанесено в соответствии с [Ковтун, 2011]. (А) – Квазидвумерная инверсия по результатам АМТ/МТ зондирований [Ковтун, 2011] Треугольниками показаны пункты зондирований. (Б) – Квазидвумерная инверсия эффективного импеданса по результатам зондирований 2013-2015 гг. (В) – Трехкомпонентная двумерная сглаживающая инверсия по алгоритму Reboss (Siripurnvaraporn) (Г) – Двумерная детерминантная инверсия по алгоритму 2DInv [Варенцов, 2003]

На рис. 2 показаны результаты анализа инвариантов типпера. Индукционные векторы (показывают направление перпендикулярно от проводника в конвенции Визе), ярко отражают переходную зону между геоблоками и разломные структуры. Эллипсы горизонтального магнитного тензора имеют форму, отличную от окружности над горизонтально неоднородными средами, длины индукционных стрелок пропорциональны степени неоднородности.

Для первичного качественного сравнения с результатами АМТ зондирований была выполнена квазидвумерная инверсия полученных данных (рис. 1б). Она подтвердила первоначальное предположение о наличии двух ядер проводящих структур и высокую контрастность аномалии – 1-20 Ом*м на фоне 1000-10000 Ом*м удельного сопротивления вмещающих пород. Совместная двумерная сглаживающая инверсия данных импеданса и типпера по алгоритму REBOCC (Siripurnvaraporn), как и одномерная, производилась в диапазоне частот от 0.0034 до 7360 секунд с одномерным стартовым полупространством с удельным сопротивлением 100 Ом*м. По её результатам (рис. 1в) аномальные

структуры уже более существенно разделяются, можно выделить тренды залеганий – более пологое для северо-восточного тела, и крутые падения, приуроченные к разломным Сортавальской и Янисъярвинским зонам. Более точная интерпретация этого разреза затруднена из-за псевдокорней аномалии, возникающих из-за специфики работы алгоритма и его слабой устойчивости к трехмерным искажениям.

Для построения более точной и гладкой двумерной модели использовался алгоритм двумерной инверсии с кусочно-непрерывной аппроксимацией и модельной параметризацией 2DInv [Varentsov, 2007]. Эта методика подразумевает использование робастных алгоритмов обработки данных и покомпонентную весовую стратегию с приоритетом к фазовым параметрам. Данный алгоритм позволяет не только эффективно подавить шумы на наблюдаемых данных, но и существенно снизить влияние локальных трехмерных искажений (рис. 1г).

Для дальнейшего комплексного анализа была выбрана модель, полученная в рамках инверсии детерминанта эффективного импеданса, как правило, обеспечивающего стабильное (в меньшей степени зависящее от 3D искажений) построение достаточно хорошо разрешенного разреза глубинной электропроводности в пределах одного профиля.

Полученный разрез (рис. 3) позволяет сделать выводы, что аномалия образована не одним объектом, а сложной композицией проводящих объектов различной структуры и происхождения. Серия полого погружающихся к юго-западу неоднородно-проводящих горизонтов в верхней и средней коре, выходящих на поверхность в местах картирования известных разломов, оказалась наиболее яркой и устойчивой общей чертой всех получаемых решений обратной задачи, как частичных – по отдельным компонентам, так и мультикомпонентных.

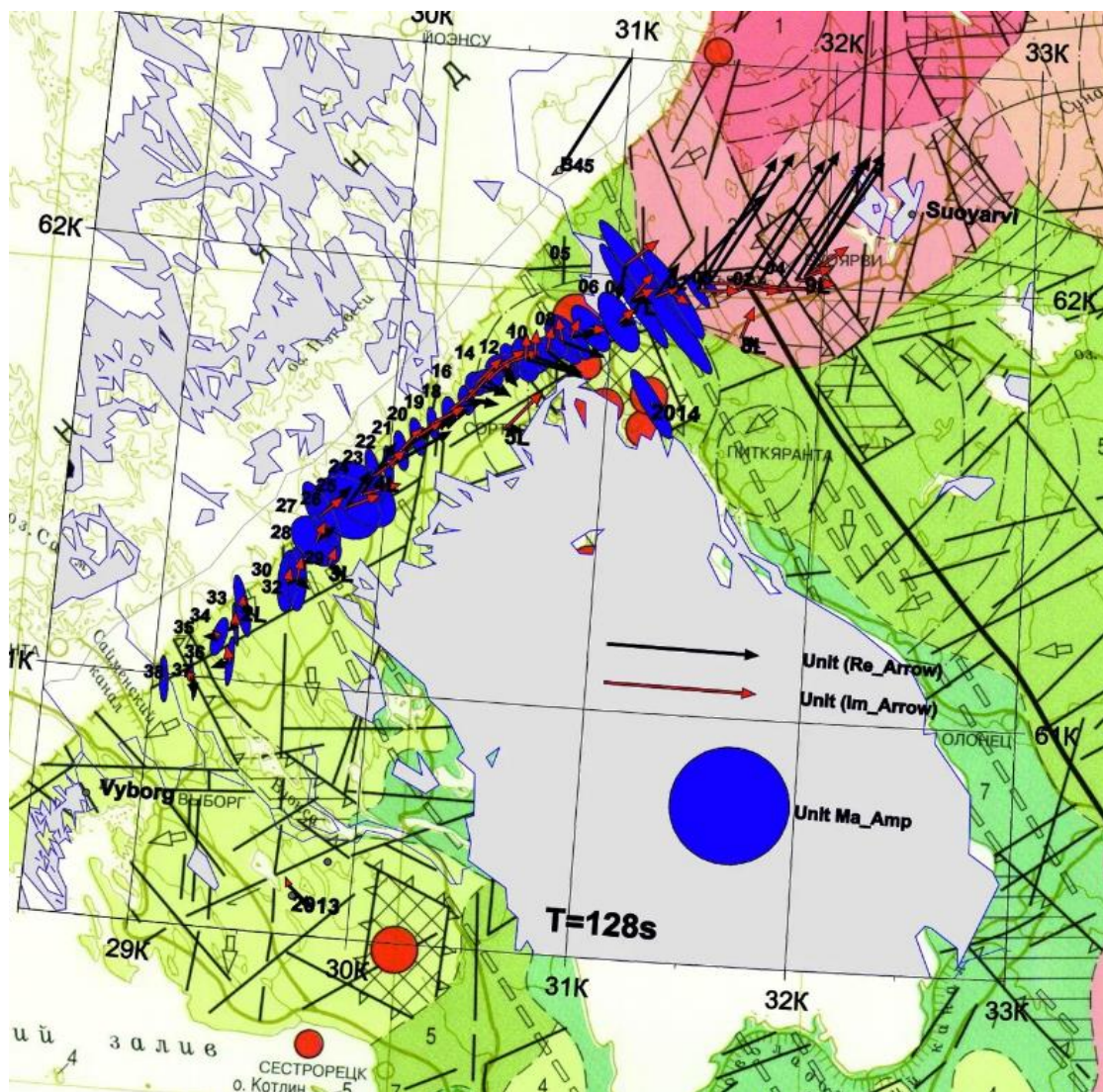


Рис. 2. Положение профиля Выборг-Суоярви-2 на неотектонической карте. Вынесены индукционные векторы (вещественные – черные, мнимые – красные) и экстремальные эллипсы горизонтального магнитного тензора для периода 128 с

В средне- и нижнекоровых уровнях изученные структуры, как правило, характеризуются отчетливым юго-западным падением, наиболее вероятно, приуроченные к контактовым надвиговым зонам с графитосодержащими супракрустальными поверхностями палеопротерозойских свекофеннид в процессе их срастания на юго-западной границе Карельского кратона в конце Палеопротерозоя [Минц, 2018]. В верхней части разреза они имеют большую крутизну падения и приурочены к основным разломам, выявленным на поверхности, в том числе неотектоническим, расположенным в области Раахе-Ладожской зоны. В этих структурах возможно также присутствие минерализованной метеорной воды, обеспечивающей добавочную компоненту ионной проводимости.

В ЮЗ части разреза на глубинах 15-25 км наблюдается существенное увеличение суммарной мощности (интегральной проводимости) проводящих структур, по-видимому, формирующих обнаруженную в ходе пионерских зондирований в регионе Приладожья низкочастотную магнитовариационную Ладожскую аномалию. В верхней коре (5-7 км) СВ части профиля выявляются чашеобразные проводящие структуры, находящиеся в хорошей корреляции с картиной распределения аномальной магнитной восприимчивости, а также с данными геологического картирования на территории Северного Приладожья, прослеживающего по маркирующим горизонтам сульфидных сланцев, сопровождающих калевийский вулканизм, пологие складки супракрустальных толщ ладожской серии [Свириденко и др., 2017].

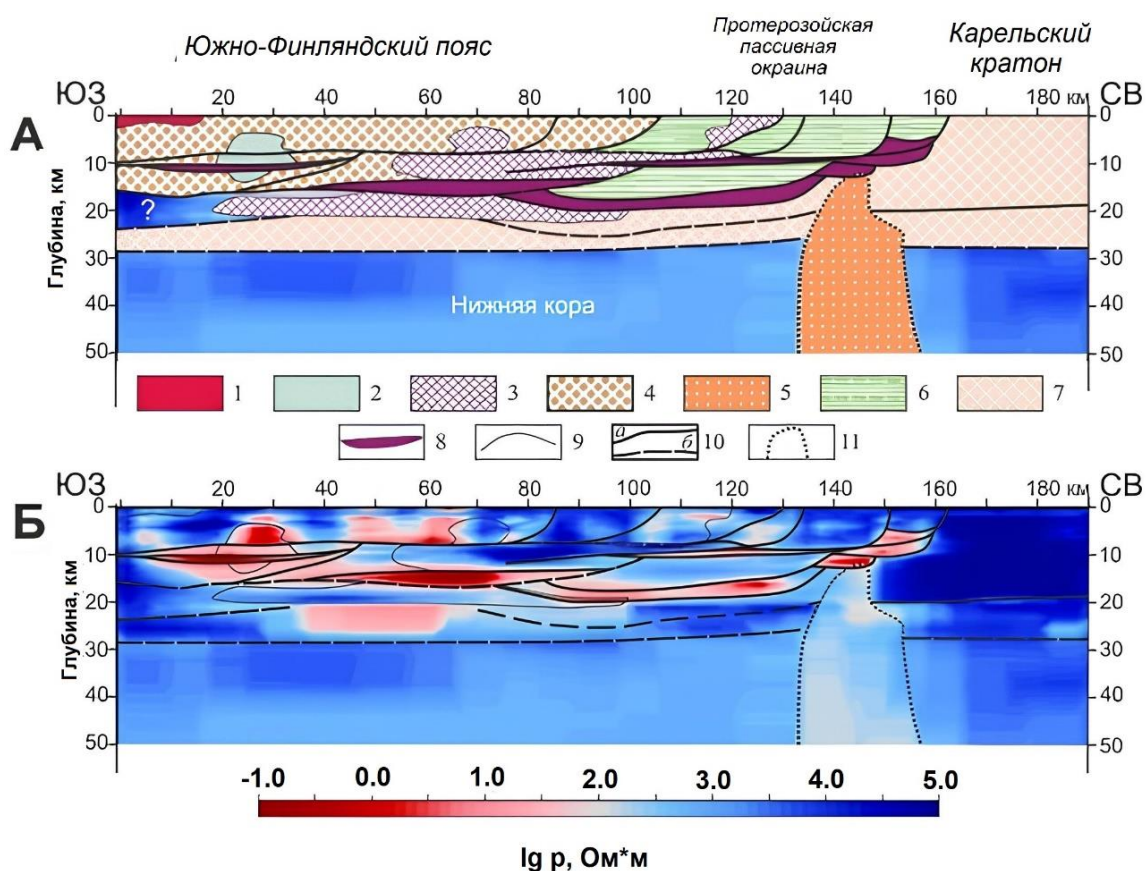


Рис. 3. Геологическая интерпретация результатов МТ/МВ зондирований профиля Выборг-Суоярви. (А) – Геологическая модель, (Б) – Границы структур, наложенные на геоэлектрический разрез двумерной детерминантной инверсии. 1 – граниты рапакиви Выборгского массива; 2-3 – интрузивные тела: 2 – сульфидоносные габброиды (плотность – 2.83, повышенная электропроводность), 3 – щелочные ультраосновные породы (плотность – 2.9, повышенное сопротивление); 4 – гранулиты (плотность – 2.75-2.8, повышенная электропроводность графитоносных прослоев); 5 – область пониженного сопротивления в пограничной зоне между архейской корой Карельского кратона и палеопротерозойскими комплексами Свекофеннского орогена и Южно-Финляндского гранулитового пояса, предположительно коррелируется с областью гомогенизированной коры, занимающей аналогичное структурное положение; 6 – метасадки и метавулканиты пассивной окраины с проводящим слоем, обогащенным графитом в основании; 7 – архейский гранито-гнейсовый комплекс Карельского кратона; 8 – зоны и прослои высокой электропроводности – прослои и линзы сланцев и гранулитов, обогащенных графитом, и зоны разломов, насыщенные графитом, 9 – границы интрузивных тел, 10 – разломы, преимущественно надвигового типа, проведенные уверенно (а), предполагаемые (б); 11 – граница области гомогенизированной коры

Основным источником информации о структуре аномальных потенциальных полей Северного Приладожья являются карты масштаба 1 : 200 000, изданные в составе государственной геологической карты [Степанов и др., 2013]. Разные исследователи используют эти данные для построения трехмерных эффективных плотностных и магнитных моделей, которые используются в качестве вспомогательных инструментов при построении геолого-геофизических моделей Северного Приладожья. Однако из-за недостаточной разрешенности и существенной высоты аэросъемки эти данные не подходят для детального исследования разломных зон Северного Приладожья.

Для исследования верхней части разреза в 2025 году была проведена аэросъемка с беспилотными воздушными судами (БВС) над участком профиля Выборг-Суоярви от точки -01 до точки 07, пересекающим Янисъярвинский разлом. Съёмка проводилась по двум параллельным профилям на расстоянии 500 метров на установке Геоскан-401 с магнитометром Geoshark. Предварительные результаты показали (рис. 4), что разломные структуры Раахе-Ладожской зоны довольно четко отражаются в виде локальных положительных аномалий на фоне регионального аномального магнитного поля. Таким образом, в дальнейшем планируется продолжение съемки вдоль профиля Выборг-Суоярви для более точного восстановления строения верхней части разреза, уточнения положения разломных зон и комплексного анализа геофизических данных в Северном Приладожье.

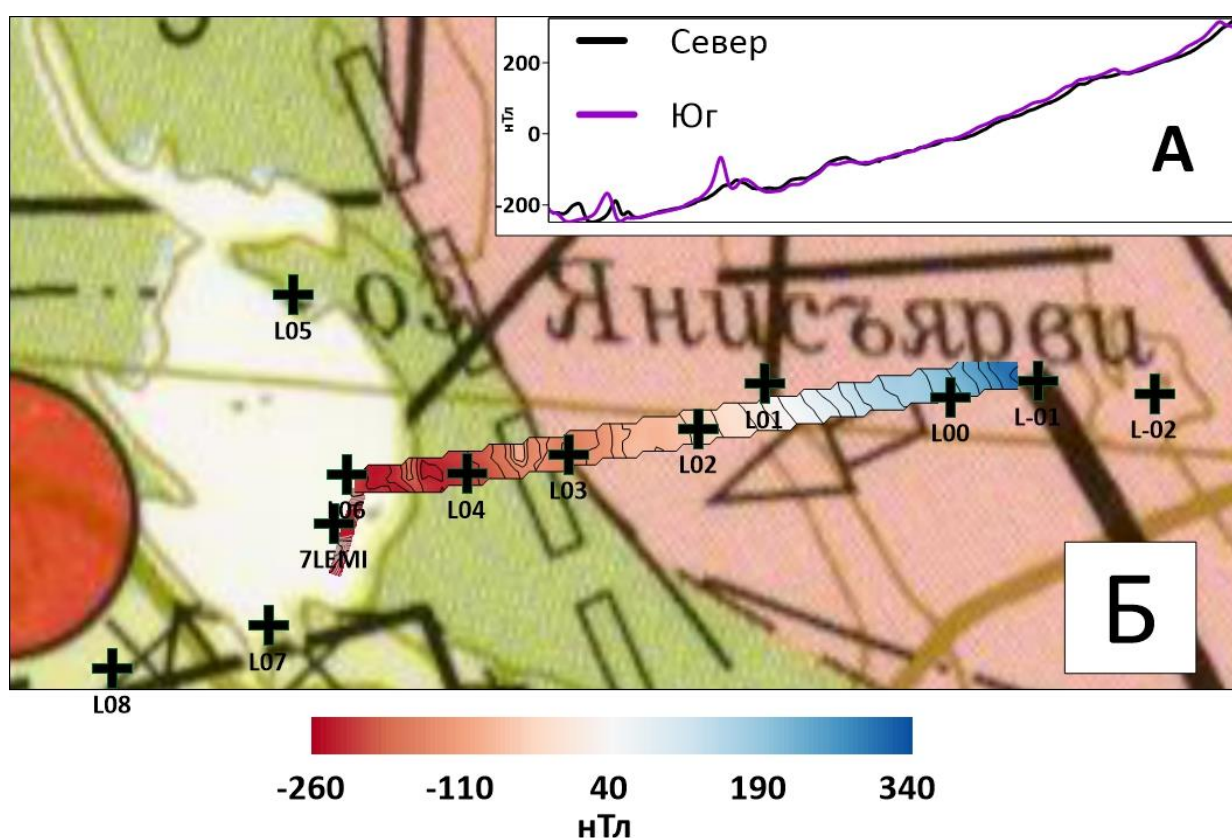


Рис. 4. Результаты аэромагнитной съемки над участком профиля Выборг-Суоярви (А) – кривые аномального магнитного поля вдоль профилей Север и Юг; (Б) – на неотектонической карте. Крестиками показано положение пунктов МТ-МВ зондирований 2013-2015 гг. На неотектонической карте розовым цветом выделены зоны слабых поднятий, зелёным – интенсивных дифференцированных движений с преобладанием опусканий. Пунктиром показано положение омоложенных разломов Раахе-Ладожской зоны

Литература

1. Варенцов И.М., Соколова Е.Ю. и др. Система передаточных операторов электромагнитного поля для массива синхронных зондирований BEAR // Физика Земли. 2003. №2. С. 30–61.
2. Ковтун А.А., Варданыц И.Л., Успенский Н.И. Сопоставление сейсмической и геоэлектрической моделей Ладожско-Ботнической аномальной зоны// Вопросы геофизики. 2011. Выпуск 44.

3. Минц М.В., Соколова Е.Ю., Варданянц И.Л., Смирнов М.Ю., Успенский Н.И., Голубцова Н.С., Куликов В.А., Пушкарев П.Ю., Таран Я.В., Золотая Л.А., Коснырева М.В., Яковлев А.Г. Объемная модель глубинного строения свекофеннского аккреционного орогена по данным мов-огт, мтз и плотностного моделирования // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. №2. С. 34–61.
4. Свириденко Л.П., Исанина Э.В., Шаров Н.В. Глубинное строение, вулканоплутонизм и тектоника Приладожья" // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2017. №2. С. 73-85.
5. Степанов К.И., Санин Д.М., Санина Г.Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000 Издание второе, Карельская серия листы Р-35-XXIV, Р-36-XIX. Объяснительная записка. ВСЕГЕИ. 2013. 230 с.
6. Шаров Н.В., под ред. Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерогения). Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2020.
7. Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A., Kovtun A.A., Palshin N.A., Smirnov M.Yu., Tokarev A., Asming V.E., Vanyan L.L., Vardaniants I.L. & the BEAR Working Group Crustal conductivity in Fennoscandia - a compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield // Earth Planets Space.2022. №54. P. 535–558.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ПРОГРАММА ДЕВЯТОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ МОЛОДЕЖНОЙ
ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ-СЕМИНАРА «СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИКА.
МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ»**

21 ОКТЯБРЯ (ВТОРНИК)

Конференц-зал ИФЗ РАН

10-00 – 10-30	Регистрация участников молодежной тектонофизической школы-семинара
10-30 – 11-00	ОТКРЫТИЕ Девятой Всероссийской молодежной тектонофизической школы-семинара «СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИКА. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ» Приветственное слово: Сопредседатель оргкомитета, гнс ИФЗ РАН, д. физ-мат. н. Ю.Л. Ребецкий Заместитель председателя оргкомитета, зав. лаб., внс ИФЗ РАН, к. геол.-мин. н. А.В. Маринин

Утреннее заседание (11-00 – 13-05)

Секция 1. Изучение напряженно-деформированного состояния земной коры. Доклады молодых ученых

Конвинер: к. геол.-мин. н. Маринин Антон Витальевич

11-00	<i>Бондарь Иван Владимирович</i> Обзор тектонофизических исследований Крымского региона	ИФЗ РАН, г. Москва
11-25	<i>Кузнецов Михаил Аркадьевич, Н.А. Гордеев, Н.Н. Дунаев</i> Напряженно-деформированное состояние массивов пород острова Южная Георгия (Антарктика)	Институт океанологии РАН, г. Москва
11-50	<i>Крикун Никита Сергеевич, Н.А. Гордеев, Д.Е. Ушаков, И.А. Бабенко</i> Изучение тектонических деформаций, морфологии и кинематики разломов оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида) по результатам 70-й РАЭ (Online)	СПб горный университет, г. Санкт-Петербург
12-15	<i>Молчанов Алексей Борисович, Н.А. Гордеев</i> SimSGM: автоматический поиск участков локального сжатия и растяжения	ИФЗ РАН, г. Москва
12-40	<i>Гордеев Никита Александрович</i> Аэротектонофизика, опыт картирования трещиноватости	ИФЗ РАН, г. Москва
13-05 – 14-00	Перерыв на обед	

Вечернее заседание (14-00 – 19-30)

Секция 1. Изучение напряженно-деформированного состояния земной коры. Доклады лекторов

Конвинер: д. физ.-мат. н. Ребецкий Юрий Леонидович

14-00	<u>Антон Витальевич Маринин</u> Тектонофизические аспекты развития Большого Кавказа	ИФЗ РАН, г. Москва
15-00	<u>Владимир Георгиевич Трифонов, Д.М. Бачманов</u> Соотношение активных разломов и офиолитов в Альпийско-Гималайском поясе	ГИН РАН, г. Москва

16-00 – 16-10	Перерыв
----------------------	----------------

Секция 1. Изучение напряженно-деформированного состояния земной коры. Доклады молодых ученых

Конвинер: к. геол.-мин. н., Тверитинова Татьяна Юрьевна

16-10	<u>Мануилова Екатерина Алексеевна, Т.Ю. Тверитинова</u> Тектонические напряжения северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны. Результаты, полученные в ходе экспедиции РГО по маршруту Байкало-Амурской магистрали	ИФЗ РАН, г. Москва
16-35	<u>Батов Алексей Владимирович, Н.А. Гордеев, Т.В. Гудкова</u> Применение SimSGM для реконструкции полей напряжений в районе Cerberus Fossae на Марсе	ИФЗ РАН, г. Москва
17-00	<u>Гордеев Никита Александрович, Л.А. Сим</u> Кинематика разрывных нарушений на месторождении Олимпиада на основе данных о поясах трещиноватости в сравнении с результатами других методов тектонофизики	ИФЗ РАН, г. Москва

17-25 – 17-35	Перерыв
----------------------	----------------

Конвинер: к. геол.-мин. н., Тверитинова Татьяна Юрьевна

17-35	<u>Молчанов Алексей Борисович, Н.А. Гордеев</u> Опыт применения методов ДЗЗ в ПО SimSGM	ИФЗ РАН, г. Москва
18-00	<u>Мануилова Екатерина Алексеевна</u> Взаимосвязь флювиальных форм рельефа и современных тектонических структур Таманского полуострова	ИФЗ РАН, г. Москва
18-25	<u>Евсеев Михаил Николаевич</u> Упругие и пластичные напряжения и деформации в утолщающихся океанических плитах	ИФЗ РАН, г. Москва

18-50 – 19-30	Обсуждение докладов
----------------------	----------------------------

22 ОКТЯБРЯ (СРЕДА)

Утреннее заседание (09-00 – 13-15)

Секция 2. Океаны. Арктика, Антарктика. Доклад лектора

Конвинер: д. физ.-мат. н. Ребецкий Юрий Леонидович

09-00	<u>Соколов Сергей Юрьевич</u> Трансформация представлений о глубинных мантийных неоднородностях и нестандартные схемы активных тектонических элементов в океане по геолого-геофизическим данным	ГИН РАН, г. Москва
-------	--	-----------------------

10-00 – 10-10	Перерыв
----------------------	----------------

Секция 2. Океаны. Арктика, Антарктика. Доклады молодых ученых

Конвинер: к. геол.-мин. н. Гордеев Никита Александрович

10-10	<u>Боголюбский Вячеслав Андреевич</u> Структурообразование в районах взаимодействия спрединговых хребтов и внеосевых мантийных плюмов	ГИН РАН, г. Москва
10-35	<u>Крылов Артём Александрович</u> Основные эндогенные геопасности в российском секторе Северного Ледовитого океана	Институт океанологии РАН, г. Москва
11-00	<u>Артемьев Олег Андреевич, С.Ю. Соколов</u> Связь неотектонических деформаций разломной зоны Чарли Гиббс на поверхности дна с глубинными мантийными неоднородностями (Online)	ГИН РАН, г. Москва
11-25	<u>Боголюбский Вячеслав Андреевич, С.Ю. Соколов, С.В. Харченко</u> Структурные стили фундамента Северной Атлантики по данным спектральных характеристик гравитационного поля	ГИН РАН, г. Москва

11-50 – 12-00	Перерыв
----------------------	----------------

Секция 3. Тектонофизическое аналоговое и численное моделирование. Доклады молодых ученых

Конвинер: Бондарь Иван Владимирович

12-00	<u>Гараванд Абузар</u> Анализ разрушения толстостенного цилиндра с учётом неупругого поведения материала (Online)	ИФЗ РАН, г. Москва
12-25	<u>Корбутяк Анна Николаевна</u> Применение метода активной термографии для оценки потенциальной флюидопроницаемости сдвиговых зон в аналоговых моделях: первый опыт	МГУ, г. Москва
12-50	<u>Мяжков Дмитрий Сергеевич</u> Моделирование нагружения земной коры в области развития магматических тел различных типов. Напряжённо-деформированное состояние коры Центрально-Азиатского складчатого пояса и Кольского региона	ИФЗ РАН, г. Москва

13-15 – 14-15	Перерыв на обед
----------------------	------------------------

Вечернее заседание (14-15 – 19-30)

14-15 – 15-00	Экскурсия по лабораториям ИФЗ РАН
----------------------	--

Секция 3. Тектонофизическое аналоговое и численное моделирование. Доклад лектора

Конвинер: д. физ.-мат. н. Ребецкий Юрий Леонидович

15-00	<u>Стефанов Юрий Павлович</u> Численное моделирование процессов деформации и разрушения в геосреде	ИНГТ СО РАН, г. Москва
-------	---	---------------------------

16-00 – 16-10	Перерыв
----------------------	----------------

Секция 3. Тектонофизическое аналоговое и численное моделирование. Доклады молодых ученых

Конвинер: к. физ.-мат. н. Мягков Дмитрий Сергеевич

16-10	<u>Ребецкий Юрий Леонидович, А. Гараванд</u> Численное моделирование механизма образования отрывной трещиноватости в осадочных бассейнах	ИФЗ РАН, г. Москва
16-35	<u>Казначеев Павел Александрович, Д.В. Краюшкин, З.-Ю.Я. Майбук, А.В. Пономарев, А.В. Патонин, Н.А. Закржевская, И.Н. Мигунов, В.В. Кох</u> Некоторые результаты исследования смещений на лабораторной модели разлома	ИФЗ РАН, г. Москва
17-00	<u>Докучаева Анастасия Игоревна</u> Численное моделирование зоны сдвига по разлому при современном движении земной коры	ИПКОН РАН, г. Москва

17-25 – 17-35	Перерыв
----------------------	----------------

Конвинер: Конвинер: Бондарь Иван Владимирович

17-35	<u>Ложкин Денис Витальевич, И.А. Пантелеев, В. Ляховский</u> Ориентация зоны локализованной поврежденности в горных породах в условиях традиционного и истинного трёхосного сжатия	ИМСС УрО РАН, г. Пермь
18-00	<u>Индаков Глеб Сергеевич, П.А. Казначеев, З.-Ю.Я. Майбук, А.В. Пономарев, М.А. Матвеев, Ю.А. Морозов, Н.Б. Подымова</u> Кластеризация импульсов акустической эмиссии в экспериментах по нагреву образцов горных пород	ИФЗ РАН, МГУ, г. Москва
18-25	<u>Мягков Дмитрий Сергеевич</u> Моделирование затухания поля напряжений в области развития локализованного сдвига	ИФЗ РАН, г. Москва

18-50 – 19-30	Обсуждение докладов
----------------------	----------------------------

23 ОКТЯБРЯ (ЧЕТВЕРГ)

Утреннее заседание (09-00 – 12-25)

Секция 4. Геофизические методы исследования. Доклады лекторов

Конвинер: д. физ.-мат. н. Ребецкий Юрий Леонидович

09-00	<i>Горбатилов Андрей Вениаминович, А.А. Цуканов, М.Ю. Степанова, Н.В. Андреева, Н.Г. Кошевой, Ю.В. Харазова</i> Практика применения метода микросейсмического зондирования в задачах тектоники и геологоразведки	ИФЗ РАН, г. Москва
10-00	<i>Гоев Андрей Георгиевич, К.А. Докукина</i> Строение литосферы и древняя тектоника Кольского региона по новым сейсмологическим данным	ИФЗ РАН, ИДГ РАН, г. Москва

11-00 – 11-10	Перерыв
----------------------	----------------

Секция 4. Геофизические методы исследования. Доклады молодых ученых

Конвинер: Лермонтова Анастасия Сергеевна

11-10	<i>Таран Яна Валентиновна, И.М. Алешин, К.И. Холодков, Ф.В. Передерин</i> Геофизические исследования Раахе-Ладожской зоны в Северном Приладожье	ИФЗ РАН, г. Москва
11-35	<i>Кулешов Дмитрий Александрович</i> Определение параметров вековой вариации геомагнитного поля при проведении геомагнитных наблюдений на Байкальском и Алтайском геодинамических полигонах за 1997-2024 гг.	ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск
12-00	<i>Королева Александра Олеговна</i> Инструментальные возможности ОКО-3 АБ-100МЗ для исследования структурных деформаций четвертичных и коренных отложений (на примере северного побережья Онежского озера)	ИФЗ РАН, г. Москва

12-25 – 13-30	Перерыв на обед
----------------------	------------------------

Вечернее заседание (13-30 – 19-00)

Секция 5. Тектонофизика и полезные ископаемые. Доклады лекторов

Конвинуеры: д. физ.-мат. н. Ребецкий Юрий Леонидович, к. геол.-мин. н. Маринин Антон Витальевич

13-30	<u>Гогоненков Георгий Николаевич</u> Сдвиговая тектоника и нефтегазовые месторождения Западной Сибири	ВНИГНИ, г. Москва
14-30	<u>Ребецкий Юрий Леонидович</u> Особенности эволюции развития субдукционных зон, как фактор формирования рудных месторождений гидротермального генезиса	ИФЗ РАН, г. Москва
15-30	<u>Дубиня Никита Владиславович</u> Изучение напряженного состояния верхних слоев Земной коры для решения прикладных задач освоения и разработки нефтегазовых месторождений	ИФЗ РАН, г. Москва

16-30 – 16-40	Перерыв
----------------------	----------------

Секция 5. Тектонофизика и полезные ископаемые. Доклады молодых ученых

Конвинуер: к. физ.-мат. н. Гараванд Абузар

16-40	<u>Воронов Иван Андреевич, Н.В. Дубиня</u> Применение геомеханического моделирования для прогнозирования распределения естественных трещин в пластах нефтегазового месторождения, расположенного в Западной Сибири (Online)	ИФЗ РАН, МФТИ, г. Москва
17-05	<u>Барaboшкин Евгений Евгеньевич, О.А. Волкова, Д.М. Орлов, Д.А. Коротеев</u> Искусственный интеллект и компьютерное зрения для описания трещиноватости горных пород	Digital Petroleum, Сколтех, г. Москва
17-30	<u>Силевич Александр Сергеевич</u> Линеаментный анализ по цифровой модели рельефа для выявления природных каналов миграции метана	ИПКОН РАН, г. Москва
17-55	<u>Куприн Даниил Юрьевич, Н.В. Дубиня</u> Статистическая обработка результатов автоматической интерпретации микроимиджеров (Online)	ИФЗ РАН, г. Москва

18-20 – 19-00	Обсуждение докладов
----------------------	----------------------------

24 ОКТЯБРЯ (ПЯТНИЦА)**Утреннее заседание (09-00 – 13-05)**

Секция 6. Сейсмические и геологические опасности. Доклады молодых ученых

Конвинер: к. геол.-мин. н. Мануилова Екатерина Алексеевна

09-00	<u>Полец Анастасия Юрьевна</u> Напряженное состояние Тихоокеанского побережья Камчатки (Online)	ИМГиГ ДВО РАН, г. Южно- Сахалинск
09-25	<u>Пашичев Борис Николаевич</u> Структурный фактор при прогнозе опасности внезапных выбросов угля и газа	ИПКОН РАН, г. Москва
09-50	<u>Дегтярев Владислав Анатольевич, П.А. Каменев</u> Взаимосвязь распределения сейсмичности Западного Сахалина и особенностей геологического строения (Online)	ИМГиГ ДВО РАН, г. Южно- Сахалинск

10-15 – 10-25	Перерыв
----------------------	----------------

Конвинер: к. геол.-мин. н. Сенцов Алексей Андреевич

10-25	<u>Тимошина Валерия Алексеевна</u> Взаимосвязь неотектонических напряжений и опасных геологических процессов на территории Черноморского побережья Кавказа	ООО НИИ Кубаньгеология, г. Краснодар
10-50	<u>Дегтярев Владислав Анатольевич, П.А. Каменев</u> О геодинамических процессах на о. Сахалин в кайнозое (Online)	ИМГиГ ДВО РАН, г. Южно- Сахалинск
11-15	<u>Стрельников Андрей Андреевич</u> Параметризация палео и исторических землетрясений района Торунь- Айгыр, Северного Тянь-Шаня	ИФЗ РАН, г. Москва

11-40 – 11-50	Перерыв
----------------------	----------------

Конвинер: к. геол.-мин. н. Сенцов Алексей Андреевич

11-50	<u>Шевьёва Надежда Сергеевна</u> Исследование сеймотектонических деформаций, связанных с серией сильнейших землетрясений начала XXI в. в Чили	Институт океанологии РАН, г. Москва
12-15	<u>Стрельников Андрей Андреевич</u> Параметризация палео и исторических землетрясений Таласского Ала-Тоо, Западного Тянь-Шаня	ИФЗ РАН, г. Москва
12-40	<u>Досайбекова Самал Кенжебековна, Ж.Б. Досымбекова, Ж.К. Жунусова</u> Изучение механизм очагов землетрясений в регионе Заилийского Алатау на основе данных за 2000-2024 гг.	ННЦ СНИ, г. Алматы, Казахстан

13-05 – 14-00	Перерыв на обед
----------------------	------------------------

Вечернее заседание (14-00 – 20-00)

Секция 6. Сейсмические и геологические опасности. Доклад лектора

Конвинер: д. физ.-мат. н. Ребецкий Юрий Леонидович

14-00	<u>Леонов Михаил Георгиевич</u> Фрагментированность земной коры: формы, размерность, структурно-вещественное выражение (в развитие идей академика М.В. Садовского)	ГИН РАН, г. Москва
-------	---	-----------------------

15-00 – 15-10	Перерыв
----------------------	----------------

Секция 6. Сейсмические и геологические опасности. Доклады молодых ученых

Конвинер: к. геол.-мин. н. Маринин Антон Витальевич

15-10	<u>Нугманов Ильмир Искандарович</u> Кластеризация участков коры, опасных для сильнейших землетрясений (Online)	Университет Иннополис, г. Иннополис
15-35	<u>Сенцов Алексей Андреевич., А.О. Агибалов</u> Применение морфометрических и тектонофизических методов для задач сейсмотектоники	ИФЗ РАН, г. Москва
16-00	<u>Гайдаленок Ольга Владимировна, А.И. Сысолин, С.А. Пулинец, А. Сеспед, С. Тосо, М. Браво</u> Мультидисциплинарная платформа для прогнозирования землетрясений	Независимый. исследователь, Монтевидео, Уругвай

16-25 – 16-35	Перерыв
----------------------	----------------

Конвинер: к. геол.-мин. н. Стрельников Андрей Андреевич

16-35	<u>Понасенко Святослав Николаевич</u> Оценка расстановки пунктов временной сейсмологической сети по изменению чувствительности и максимального азимутального пробела	ИНГТ СО РАН, г. Новосибирск
17-00	<u>Новиков Михаил Андреевич, А.А. Крылов</u> Уточнение сейсмического режима в районе дельты р. Лены для оценки сейсмической опасности	Институт океанологии РАН, г. Москва
17-25	<u>Рябова Светлана Александровна</u> Отклик напряженности электрического поля, сопутствующий землетрясению в округе Сикайн 28 марта 2025 г., по данным обсерватории «Михнево» (Online)	ИДГ РАН, ИФЗ РАН, г. Москва

17-50 – 18-00	Перерыв
----------------------	----------------

18-00	<u>Джанабиллова Самал Оралгановна, А.Г. Шералхан</u> Современные деформации и сейсмическая активность Северного Тянь-Шаня (Online)	КГУТИ, г. Актау, Казахстан
18-25	<u>Молокова Алисия Павловна, А.А. Скоркина</u> Магнитудная классификация землетрясений Ключевской группы вулканов	ИТПЗ РАН, МГУ, г. Москва

18-50 – 19-00	Обсуждение докладов
19-00 – 20-00	Закрытие Девятой молодежной тектонофизической школы-семинара

Научное издание

**СОВРЕМЕННАЯ ТЕКТОНОФИЗИКА.
МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

Материалы докладов Девятой Всероссийской молодежной
тектонифизической школы-семинара

Утверждено к печати
Редакционно-издательским советом
Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
г. Москва, ул. Большая Грузинская,
д. 10, стр. 1

Формат 84×60 1/8.
Усл. печ. л. 20.75.
Тираж 25 экз.
Типография ИФЗ РАН
г. Москва, ул. Большая Грузинская,
д. 10, стр. 1