

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

На правах рукописи

ГОРДЕЕВ НИКИТА АЛЕКСАНДРОВИЧ

**НЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА СЕВЕРО-ВОСТОКА
СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**

Специальность 25.00.03 -
"Геотектоника и геодинамика"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики им. М.В. Гзовского в институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Научный руководитель – Сим Лидия Андреевна – доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук», ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты – определяются.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Работа посвящена *реконструкции тектонических напряжений для характеристики новейшей геодинамики северо-восточной части Сибирской платформы.*

Северо-восток Сибирской платформы богат самыми различными полезными ископаемыми, от углеводородов до россыпных месторождений золота, алмазов и др. минералов [Граханов..., 2010]. Для поисков и разведки таких месторождений применяют различные геологические методы и используют разнообразный материал, начиная с простейшего описания пород, слагающих территорию исследования, включающего информацию о мощности и палеогеографических условиях осадконакопления. Большое значение также имеют данные о тектоническом строении района, результатах геофизических и геохимических исследований, бурения и т.д. Северо-восток Сибири, в большой степени, является труднодоступной территорией для проведения различного рода геолого-разведочных и поисковых работ, в том числе геофизики, бурения. Поэтому в таких районах особенно важным материалом для их изучения становятся разномасштабные топографические карты, аэрофото- и космические снимки. Они позволяют детально проанализировать рельеф, выделить неотектонические структуры. Анализ особенностей неотектонической структуры в совокупности с другими геологическими данными дают важную информацию об эволюции развития района, времени формирования полезных ископаемых, путях переноса важных компонентов, местах их локализации, что, в свою очередь, позволяет сузить территории поиска месторождений. Результаты неотектонического анализа и реконструкции неотектонических напряжений дают возможность делать важные выводы о геодинамических условиях формирования новейших структур, в том числе, современных условиях.

Цель исследования - определить геодинамические условия формирования новейших структур С-В Сибирской платформы и влияния на них рифтогенеза хребта Гаккеля.

Поставленная цель определяет **задачи исследования:**

- изучение литературных и фондовых данных по неотектонике и геологии района;
- реконструкция неотектонических напряжений территории исследования;
- составление геоморфологической карты территории исследования;
- составление карты геодинамики территории исследования;
- анализ неотектонических напряжений и неотектонических структур;
- моделирование новейших структур в 3D;

– разработка компьютерной программы по реконструкции тектонических напряжений структурно-геоморфологическим методом Л.А. Сим.

Фактический материал: Диссертация написана по результатам полевых исследований 2014 года в составе полевого отряда ФГУП ЦНИГРИ, а также камеральных работ в ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта и МГУ им. М.В. Ломоносова, продолжающихся с 2014 по 2021 годы. В основу работы положены результаты структурно-геоморфологического дешифрирования топографических карт, материалы Государственной Геологической съемки масштаба 1:1 000 000, фондовые отчеты, а также опубликованные данные по геологии изучаемого района, тектонике и другим направлениям. Проведена глобальная и детальная реконструкции неотектонический напряжений методом реконструкции сдвиговых неотектонических напряжений Л.А. Сим [1991]. Автоматизирован метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений и создан программный пакет, написанный на языке программирования python [Гордеев, 2019].

Кратко о применяемых методах. В данной работе применен комплекс методов исследования: использовался структурно-геоморфологический анализ, который позволяет выявить связь рельефа с неотектоническими, в том числе, современными движениями. Этот метод применялся как в полевых, так и в камеральных условиях. В маршрутах проводилось непосредственное изучение четвертичных отложений, особенностей рельефа, в том числе, морфологии речных долин, склонов водоразделов и др. В камеральных условиях проанализированы топографические карты масштаба 1:500 000, космические снимки, цифровые модели рельефа. Для всей изучаемой территории был проведен линеаментный анализ. Линеаменты сопоставлялись с известными разрывными нарушениями. Для установления взаимосвязи глубинных структур с новейшими применено 3D геологическое моделирование. Дешифрирование карт сопровождалось построением геоморфологических профилей, проведенных как вдоль, так и вкрест выделенных структур. Профили позволяют определить особенности морфологии структур, их склонов, водоразделов. Заключительный геодинамический анализ проводился при помощи метода Л.А. Сим [1991]. Метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим был частично автоматизирован с помощью языка программирования Python. Написана программа SimSGM, основанная на компьютерном зрении.

Личный вклад автора заключается в построении карты новейшей тектоники и карты неотектонических напряжений масштабов 1:500 000 и 1:1 000 000 на основе проведенных реконструкций, собранного картографического, литературного и полевого

материала. Разработка программного обеспечения для структурно-геоморфологического метода Л.А. Сим [1991] и его модернизация. Построение 3D геологических моделей. Основные научные результаты отражены в публикациях [Сим, Гордеев, Маринин, 2018], [Сим, Маринин, Брянцева, Гордеев, 2018], [Гордеев, Молчанов, 2019], также 2 статьи по теме готовятся к изданию в «Вестник СПбГУ» и «Геосистемы переходных зон».

Научная новизна. Впервые построены на территорию северо-востока Сибирской платформы:

Карты новейшей тектоники 1:500 000 и 1:1 000 000 масштабов, несущие в себе информацию о новейших структурах и их взаимоотношениях.

Геодинамические схемы 1:500 000 и 1:1 000 000 масштабов, несущие информацию о направлениях действующих напряжений.

3D модели фундамента и чехла, несущие в себе информацию о взаимоотношениях древних и новейших структур.

Впервые проведен детальный линеаментный анализ, включающий в себя анализ разрывных структур, мегатрещин (см. 4 главу - методика), главных осей сжатия.

На языке программирования python разработан программный пакет Sim-SGM, который значительно упрощает работу структурно-геоморфологического метода Л.А. Сим по реконструкции сдвиговых неотектонических напряжений, помимо этого модернизирует метод посредством применения методов компьютерного зрения: введена возможность обработки спутниковых изображений, цифровых моделей рельефа, автоматический поиск мегатрещин, их статистическая обработка (процентное соотношение определений по палетке Гзовского, построение роз-диаграмм простираций мегатрещин).

На основе проведенных построений выявлены главные источники новейших напряжений на северо-восток Сибири, новейшие структуры, их унаследованность от древних. Обнаружена граница распространения наведенных напряжений от спрединга Хребта Гаккеля, Верхоянского орогена. На Оленекское поднятие определен способ миграции россыпных месторождений алмазов [Гордеев, 2015] и золота [Гордеев, Сим Л.А., Суханова Т.В., Бондарь И.В., 2019], геоморфологические ловушки россыпей. На территорию Оленекского поднятия и его обрамления выявлена взаимосвязь выделенных новейших структур с нефтегазоносными месторождениями (битум, газ) [Гордеев, Сим Л.А., Суханова Т.В., Бондарь И.В., 2019]. Установлено дальнедействующее воздействие Арктического спрединга на Лаптевоморский шельф и Кряж Чекановского [Гордеев, Сим, 2020; Гордеев, Сим, 2021].

Теоретическая и практическая значимость приведенных результатов заключается в проведенных реконструкциях напряженного состояния и оценке новейшей тектоники, так как площадной тектонофизической съемки на территории не проводилось, покрытие GPS станциями пока достаточно слабое, а сейсмологические исследования проводятся преимущественно на шельфе моря Лаптевых. Таким образом, получены уникальные данные о главных источниках напряжений формирующих рельеф. Получены новые данные о характере распределения полей напряжения на территории исследования. Поэтому диссертационная работа может служить основой для прогноза месторождений, выявления наиболее благоприятных участков для поиска месторождений.

В результате проведенных работ были сформулированы **3 защищаемых положения:**

1. Новейшее поле напряжения северо-востока Сибирской платформы охарактеризовано, как сдвиговое с региональным субмеридиональным сжатием;
2. Влияние процессов спрединга в Арктическом бассейне на неотектоническом этапе распространяется только на развитие Кряжа Чекановского;
3. Оленекский и Мунский своды на северо-востоке развились из-за внутриплатформенных тектонических напряжений и являются источниками напряжений для северо-востока Сибирской платформы.

Апробация результатов исследований. Результаты проведенных исследований были представлены на Тетконическом совещании XLVIII (2016 г.), L (2018 г.), LI (2019), LII (2020г.), на Трудах всероссийской научной конференции "Актуальные проблемы динамической геологии при исследовании платформенных областей" (2016 г.), на Четвертой тектонофизической конференция в ИФЗ РАН "Тектоника и актуальные вопросы наук о Земле", на Научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН (2017 – 2019 гг.), на XV Ферсмановской научной сессии, посвященной 100–летию со дня рождения д.г.-м.н. Е.К. Козлова (2018 г.), на Трудах Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН (2019 г.), VIII Российская молодёжная научно-практическая Школа "НОВОЕ В ПОЗНАНИИ ПРОЦЕССОВ РУДООБРАЗОВАНИЯ" (2018 г.), на Международной юбилейной научной конференции «Воздействие внешних полей на сейсмический режим и мониторинг их проявлений» (2018 г.), на XXV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, «Ломоносов – 2018» (2018 г.) и «Ломоносов-2019» (2019 г.), на Пятой международной конференции

"Триггерные эффекты в геосистемах" ИДГ РАН (2019 г.), шестой молодежной тектонофизической школе-семинаре (2019 г.), в сборнике Российская тектонофизика. К 100 летнему юбилею М.В. Гзовского (2019 г.),

Публикации. Основные научные результаты, полученные в диссертации, отражены в 28-и печатных работах, в том числе в 3-х работах в научных изданиях, вошедших в «перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций» рекомендуемый ВАК КР, 2-х работах, индексируемых системой РИНЦ и 1 работа системой РИНЦ и SCOPUS. Также 2 статьи проходят рецензирование в журналах из списка ВАК (Вестник СПбГУ и Геосистемы переходных зон).

Объем и структура диссертации. Диссертация общим объемом 116 страниц состоит из 4 глав, введения, заключения, иллюстрирована 48 рисунками и 1 таблицей. Список литературы включает 94 наименования. Работа выполнена в лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской Академии наук.

Благодарности. Автор выражает **благодарность** в первую очередь ведущему научному сотруднику лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики Сим Лидии Андреевне и доценту кафедры динамической геологии к.г.-м.н. Т.В. Сухановой за помощь в написании данной работы, сотрудников ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта: Ю.Л. Ребецкого и А.В. Маринина за обучение дополнительным методам исследования, полевым тектонофизическим методам и за предоставленные материалы. Также автор благодарит профессора кафедры динамической геологии Е.П. Дубинина за возможность дополнительных геодинамических исследований Лаптево-Морского региона в лаборатории геодинамики МГУ им. М.В. Ломоносова.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении сформулированы цель и задачи исследования, обоснована его актуальность, новизна и практическая значимость, показан личный вклад автора.

Глава 1. Описание территории исследования: географическое, геологическое.

В данной главе описаны география, изученность и геологическое строение района. Представлена орографическая характеристика территории исследования, описана эрозионная сеть. Приведена история изучения территории на основе обширного материала от советских геологических съемок [ГК СССР..., 1975; ГК СССР..., 1965; Кривонос В.Ф., 1968; ГГК РФ..., 2013; Галабала, 1988-1992 гг.,ф] до современных исследований

небольшими группами [Имаев..., 1998; Граханов, 2010ф; Поляков, 2011; Имаева... и др., 2016]. Описана стратиграфия четвертичных и дочетвертичных образований, тектоника и магматизм Северо-востока Сибирской платформы. При описании стратиграфии дочетвертичных образований используются материалы геологических съемок [ГГК РФ..., 2013; ГК СССР..., 1975; ГК СССР..., 1965; Об. записка, 1960; Пуминов, 1960]. В геологическом строении Лено-Оленекского междуречья принимают участие отложения нескольких структурных ярусов, различающихся характером распространения, мощностью, вещественным составом и другими признаками. Нижний, наиболее древний ярус, слагает фундамент платформы и имеет протерозойский возраст. Вышележащие ярусы, начиная с рифейского, объединяют осадочные, осадочно-вулканогенные и магматические породы с возрастным диапазоном от верхнего протерозоя (рифей) до кайнозоя включительно, и формируют плитный чехол. Мощность чехла изменяется от первых метров на склоне Сололийского поднятия до 6 км в Лено-Анабарском и Предверхоаянском прогибах, а на большей части территории она составляет порядка 3 км.

При описании стратиграфии четвертичных образований используются материалы геологических съемок [Геол. карта..., 1960; Галабала, 1988-1992 гг.,ф; Граханов 2007] и фондовые материалы [Граханов, 2010ф]. Рыхлые четвертичные отложения на территории листа развиты повсеместно. Отложения представлены разнообразными генетическими типами и фаціальными разновидностями пород. В генетическом отношении выделяются аллювиальные, элювиальные, элювиальные и делювиальные, делювиальные и солифлюкционные, коллювиальные, гляциальные, гляциофлювиальные, озерно-аллювиальные, озерно-болотные, золовые отложения и лессоиды. Ряд образований четвертичного возраста имеет сложное полигенетическое происхождение. По возрасту подразделяются на плейстоценовые (эоплейстоцен и неоплейстоцен) и голоценовые.

Глава 2. Методика исследования.

Диссертационная работа основана на комплексном применении традиционных и современных методов исследования.

Для проведения геодинамического анализа территории исследования был применен структурно-геоморфологический метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений, базирующийся на принципах тектонофизического моделирования [Сим Л.А., 1991]. Метод реконструкции тектонических напряжений платформенных территорий (СГМетод), он основан на дешифрировании всех прямолинейных элементов рельефа, названных мегатрещинами, вблизи предполагаемого или действительного разрывного нарушения. Для дешифрирования используются топографические карты, космические и аэрофотоснимки, масштаб которых зависит от

конкретных целей. СГ метод обосновывается: а) повсеместное развитие крутопадающих плоскостей разломов в осадочном чехле платформ, б) горизонтальное положение оси сжатия вблизи дневной поверхности (практически отсутствует литостатическое давление); в) данные физического [Михайлова, 2007] и математического [Ребецкий, 1987] моделирования показывают, что в осадочном чехле над сдвигом в фундаменте образуется два максимума касательных напряжений.

При изучении геоморфологического строения рассматриваемой территории был использован метод, разработанный [Макаров, 1997, Костенко, 1999]. В качестве основного метода исследования использовался структурно-геоморфологический (СГ) анализ, который позволяет выявить связь рельефа с неотектоническими, в том числе, современными движениями. Этот метод применялся как в полевых, так и в камеральных условиях. На основании СГ анализа на топографических картах были выделены и изучены новейшие структуры в пределах Лено-Оленекского междуречья. Привлечены данные предшествующих исследователей по новейшей тектонике Северо-Востока Сибирской платформы.

Для установления взаимосвязи глубинных структур с новейшими применено 3D геологическое моделирование. На основе программного обеспечения ArcGis, Global Mapper оцифровывались геологические, топографические карты, тектонические схемы. В дальнейшем были созданы базы данных в формате ASCII, Elevation data, Grid. После этого полученные данные загружались в программное обеспечение RMS, в котором создается рабочая среда для моделирования. Параметры модели нашей среды – ширина "x", глубина "y", высота "z"; система привязки координат – проекция Гаусса Крюгера на основе датума WGS84. Далее производилась загрузка файлов ASCII, Elevation data и Grid, которые мы переработали в 3D модель.

Автоматизация геодинамических реконструкций (разработка программы SimSGM). Создание программного пакета основано на идее автоматизации и модернизации СГ метода реконструкции главных осей тектонических напряжений в областях со сдвиговым геодинамическим режимом [Сим, 1991, 2000; 2011].

Для использования СГ метода требуется навык дешифрирования неотектонических разломов по космическим снимкам. Неотектонические разломы выделяются дистанционно или на месте; в настоящем исследовании нас интересует дистанционный способ выделения. Он опирается на дешифрирование сгруппированных и ориентированных вдоль некоторых линий (направлений) форм и элементов рельефа и геологических структур. Например, уступов (эрозионных, абразионных, тектонических), это могут быть спрямленные участки побережий морей, озер, эрозионных и других форм

(долин, русел), границы впадин и поднятий, возрастных и структурно-вещественных комплексов, ландшафтов лесных, болотных, почвенно-растительных покровов. Таким образом, различные формы рельефа, ландшафта и геологической структуры оказываются вытянутыми вдоль единой линии.

К настоящему моменту в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН разработан и успешно применяется программный пакет “SimSGM”, позволивший автоматизировать структурно-геоморфологический метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим (СГМ) [Сим, 1991], [Гордеев, 2019]. Последние усовершенствования программы направлены на: применение автоматических алгоритмов для регионов с отсутствующими картами высот надлежащего качества, выбор наиболее оптимальных алгоритмов автоматизации дешифрирования линеаментов, создание удобного пользовательского интерфейса программы.

На сегодняшний день в ПО “SimSGM” реализована возможность автоматического анализа как карт высот, так и спутниковых снимков при использовании четырёх различных алгоритмов компьютерного зрения для дешифрирования линеаментов (рис. 1). В работе приводится описание и сравнение данных алгоритмов в контексте поставленной задачи дешифрирования [Гордеев, 2020].

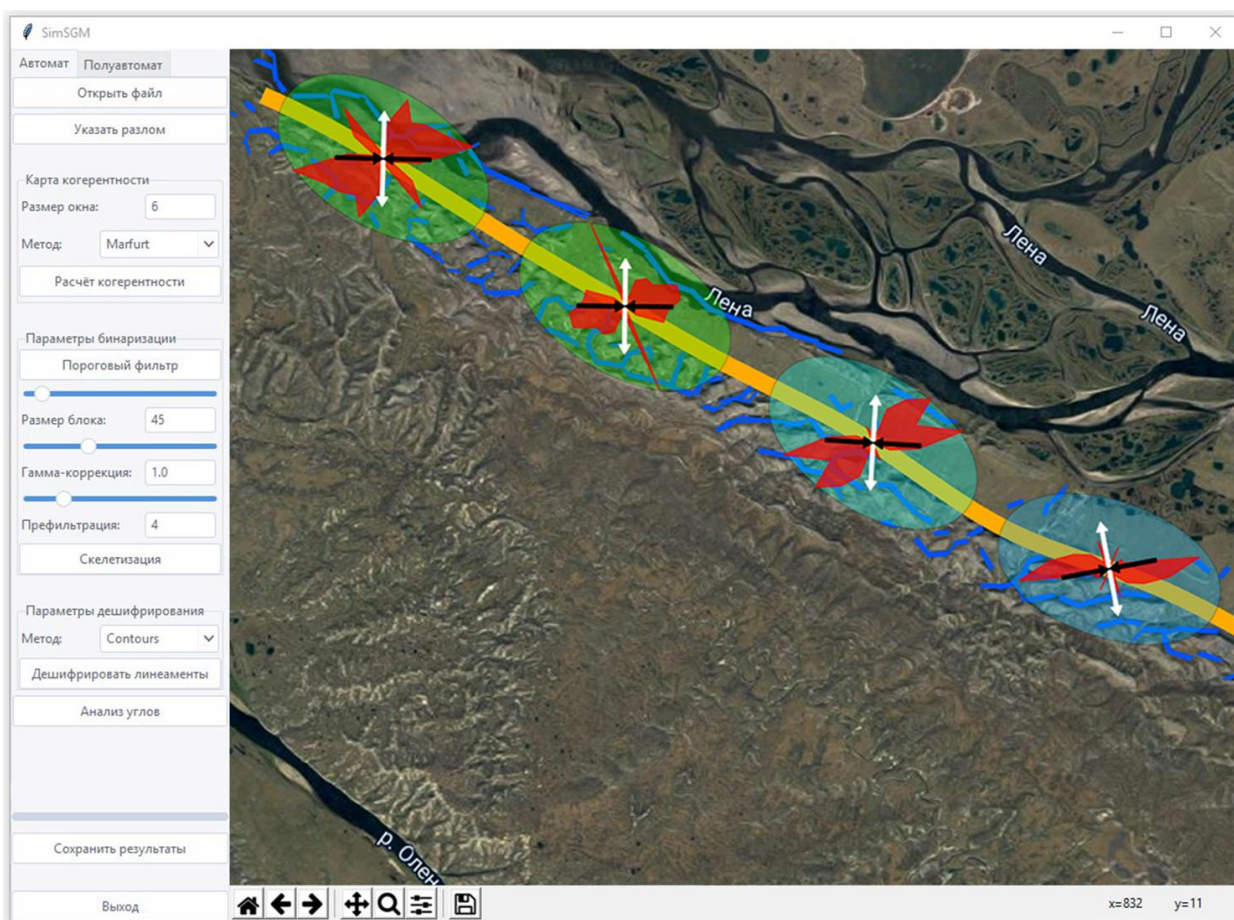


Рисунок 1. – Интерфейс программы (v. 09.2019)

ГЛАВА 3. Новейшая тектоника и геодинамические реконструкции

3.1. Новейшая структура

Данный параграф написан с использованием собственного материала [Сим, Гордеев, Маринин, 2018].

Автором изучена новейшая структура (рис. 2) исследуемой территории до настоящего времени не была детально изучена. На картах новейшей тектоники Н.И. Николаева [1979], А.Ф. Грачева [1996] Оленекское поднятие показано обобщенно, в виде двух структур с амплитудами поднятий 200-300 м, разделенных зоной прогиба. Обрамляющие его структуры на юге и востоке практически не дифференцированы.

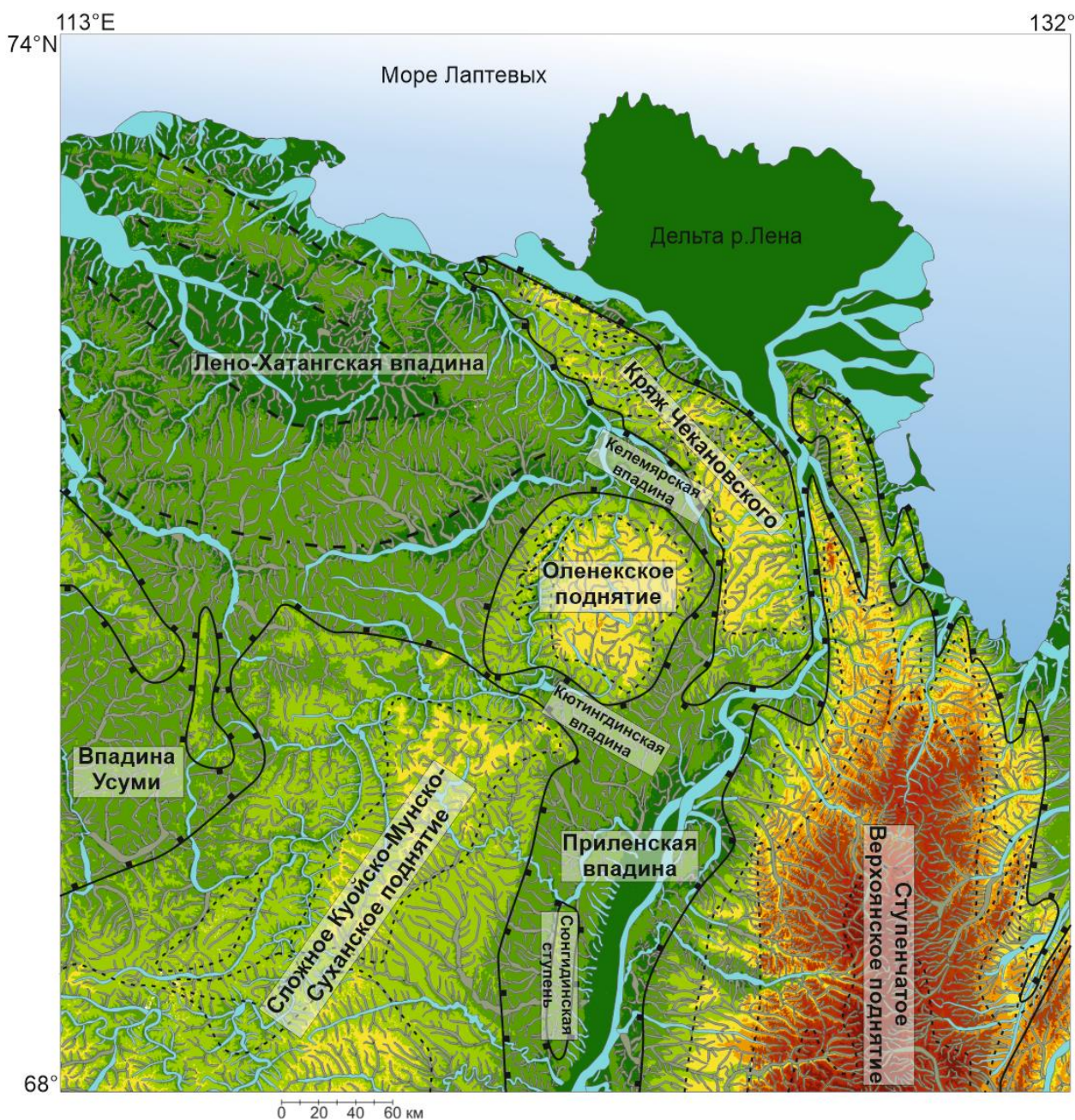


Рисунок 2. Карта Новейшей тектоники Лено-Оленекского междуречья и структур его обрамления

Неотектоника района изучалась по методике, разработанной [Макаров, 1997]. Она включает в себя такие процедуры, как построение геоморфологических профилей, анализ картографических материалов, анализ геологического строения и нанесение на топооснову результата анализа в виде карты новейшей тектоники, неотектонической карты, карты циклов развития рельефа. Конкретно в этой работе используется схема неотектоники, так как на ней отображаются новейшие структуры, необходимые для анализа новейших напряжений.

В новейшее время произошла перестройка структурного плана. Древний Оленекский свод после продолжительного платформенного этапа, прерываемого вспышками магматизма [ГГК РФ..., 2013; ГК СССР..., 1965], было унаследовано новейшим одноименным поднятием, а на месте древних прогибов образовались на север-северо-востоке - поднятие кряжа Чекановского, на юге Кютингдинский прогиб, на северо-востоке - Бурский прогиб, на севере Келимярский прогиб. К югу и юго-востоку от Оленекского поднятия на неотектоническом этапе сформировались субмеридиональные поднятия, последовательно с запада и с востока понижающиеся к Ленскому прогибу. Последнее унаследованно развивается над западным склоном древнего Приверхоянского прогиба, в то время как центральная и восточная части древнего прогиба втянуты в поднятие Верхоянского хребта.

В новейшей тектонической структуре территории Лено-Оленекского междуречья отчетливо выделяются две разноплановые области – северная и южная.

На наложенной *3D модели чехла* (рис. 3) просматривается наследственность от древних - новейшими структур и инверсионные. Унаследованными структурами являются Оленекское поднятие, Бурская впадина, Куойско-Суханское поднятие, Кютингдинская впадина (грабен) и Приленская впадина (низменность), так как под новейшими поднятиями развивались и развиваются такие древние структуры, как Мунский свод, Оленекский свод, Кютингдинский грабен и северное окончание Предверхоянского прогиба. Инверсионными считаются все остальные структуры (ступени Верхоянья: Собопольское, Джарджан-Натарское и Восточно-приленское поднятия; Западно-приленское поднятие; Кряж Чекановского. Структуры, не имеющие прямой взаимосвязи с древнейшими структурами это Мунско-Сюнгюдинское поднятие, Келимярская впадина, так как их эволюция связана с развитием смежных структур.

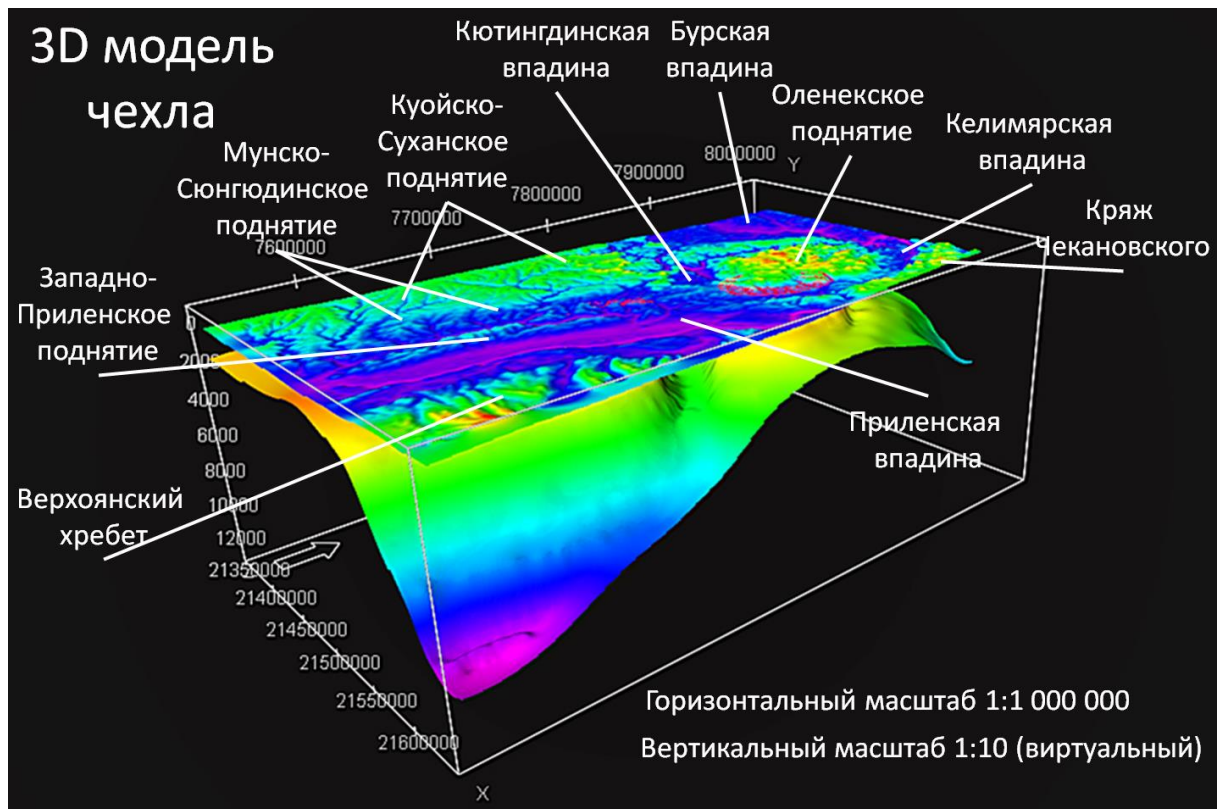


Рисунок 3. 3D модель чехла (дневная поверхность наложена на поверхность фундамента)

3.2. Общая характеристика напряженного состояния

Данный параграф написан с использованием работ [Гордеев, Молчанов, 2019; Сим, Маринин, Брянцева, Гордеев, 2018].

Для определения особенностей современных геодинамических условий, в которых развиваются все новейшие структуры территории Лено-Оленекского междуречья, и восстановления полей напряжений автором был применен структурно-геоморфологический метод анализа сопряженных с основным разломом вторичных нарушений, базирующийся на принципах тектонофизического моделирования [Сим Л.А., 1991]. В качестве разломов были использованы разрывные нарушения, выделенные по данным Геологической карты [2013], как достоверные, так и предполагаемые, в фундаменте и осадочном чехле, имеющие различную кинематику, а также предполагаемые молодые сдвиги, которые были выделены по геоморфологическим признакам. Все разломы ранжированы, определены их современные кинематические типы и ориентации осей сжатия и растяжения. В качестве оперяющих трещин были использованы мелкие прямолинейные элементы рельефа (мегатрещины), специально отдешифрированные вблизи разломов.

Схема геодинамики всего района исследований (рис. 5) составлена по четырем топокартам масштаба 1:1 000 000, на которых предварительно были выделены все

известные по разным источникам разрывы как элементы основной структуры. Линеаментный анализ по разрывам должен показать, по мнению автора, основные закономерности формирования общего поля напряжений.

Для того чтобы охарактеризовать общее поле напряжений на территорию исследований проведен детальный линеаментный анализ, в основу которого легло построение роз-диаграмм [Трещиноватость ..., 2008] по разным параметрам геологических структур. Это разрывы, главные оси напряжений и линеаменты 1 и 2 рангов.

Выделяется 3 поля напряжения 2 ранга. В области развития Кряжа Чекановского, Верхоянья и область развития сводовых поднятий – Мунского и Оленекского. Однако при общем суммировании получается результат по субмеридиональному сжатию (рис. 4) и уже второстепенное значение имеет поле напряжения северо-восточного простираия осей сжатия.

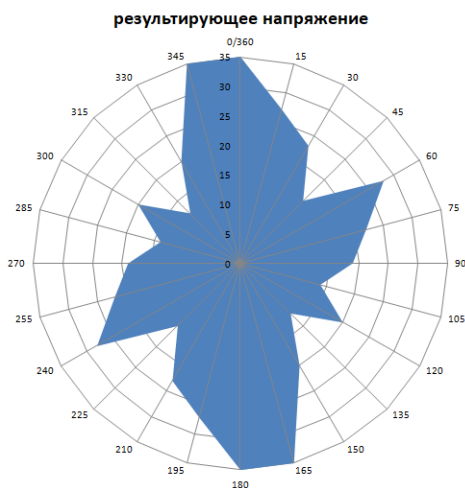


Рисунок 4. Сумма простираий всех реконструированных осей сжатия 1 и 2 ранга

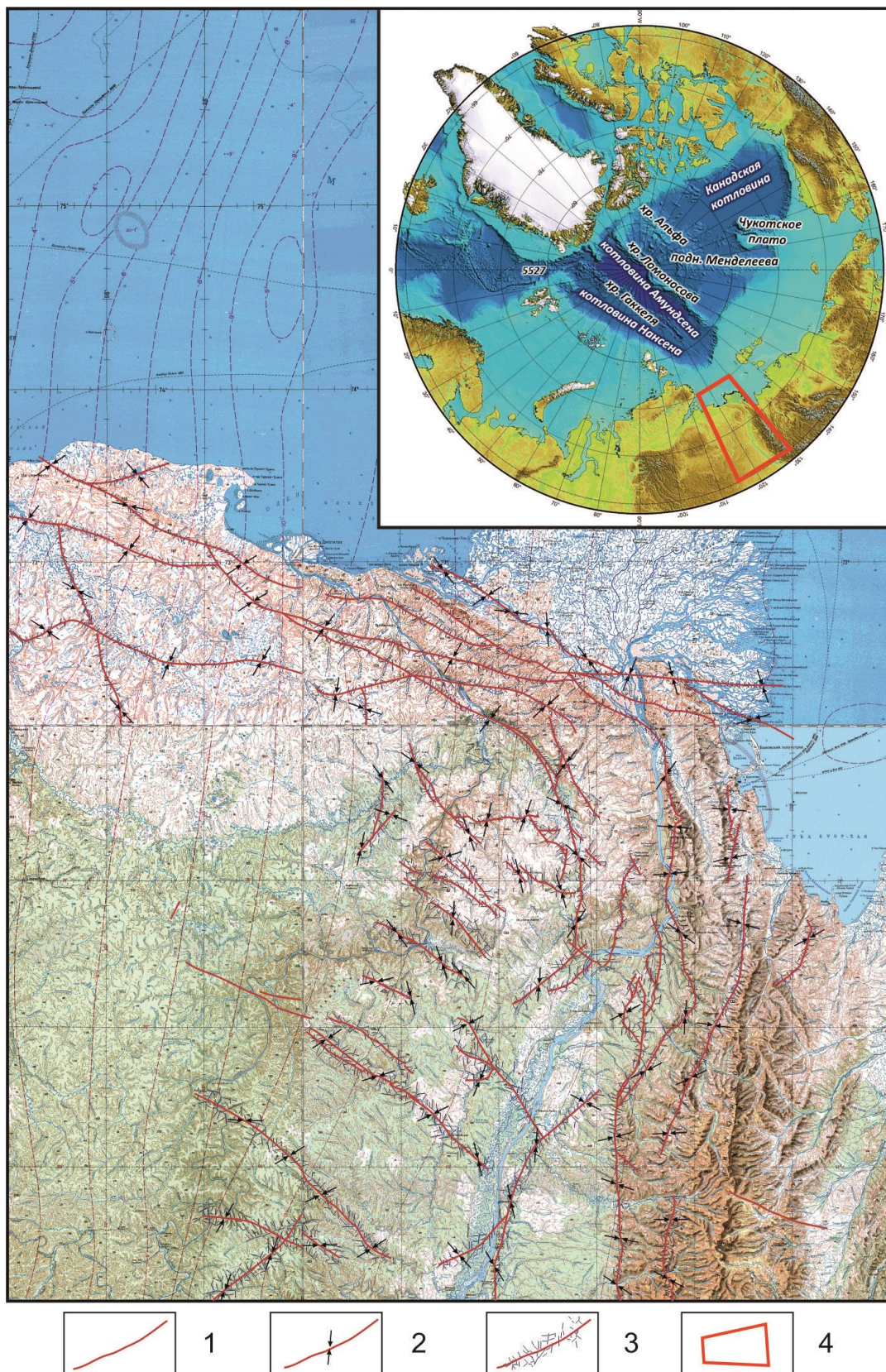


Рисунок 5. Общая схема напряжений на весь район исследований масштаба 1:1 1 000 000. На топографической подложке того же масштаба.

1 – разрывы 1 ранга; 2 – главные оси сжатия (в горизонтальной плоскости); 3 – мегаштрихи, в области разрыва; 4 – район исследований на врезке со структурной схемой и рельефом в полярной проекции

3.2.2. Влияние спрединга в Антарктике на напряженное состояние территории исследования

Данный параграф написан с использованием личных наработок [Гордеев, Молчанов, 2019], и работами опубликованными в ряде конференций.

Автором описаны геодинамические условия формирования новейших структур и их напряженно-деформированного состояния на северном регионе Сибирской платформы, которые привели к неожиданному результату, что Арктический спрединг распространяет свое влияние лишь на развитие шельфовой части и Кряж Чекановского.

Проведенный тектонофизический анализ с применением программы SimSGM [Гордеев, Молчанов, 2018] показал большое количество локальных стресс-состояний с ориентировкой осей сжатия северо-восток-восточной ориентировки. Такое положение осей сжатия свойственно разломам субширотного направления на протяжении всего участка Лено-Анабарского прогиба и выявляется лево-сдвиговая кинематика разломных структур. Для разломов субмеридиональной ориентировки в частных случаях оси сжатия ориентированы на северо-запад, что связано с развитием небольших новейших впадин: участку в самом устье р. Лена и р. Кангалас-Уэл (самый западный участок). Для субмеридиональных разломов Верхоянья свойственны оси сжатия с субширотной и северо-восточной ориентировками.

Был проведен сравнительный анализ с данными о механизмах очагов землетрясения [Имаев, Имаева, 2000], по которым совпадение определенных нами стресс-состояний совпадает с проекциями осей главного сжатия в механизмах очагов землетрясений.

Таким образом, автором установлено наличие радиально расположенных и ориентированных главных осей сжатия вокруг Оленекского поднятия указывает на наличие внутриплитных источников напряжений, никак не связанных с влиянием арктики. На север от поднятия в новейший этап развиваются эшелонированные ступенеобразные поднятия (северное окончание Кряжа Чекановского), уходящие в шельф, сжимающихся в северо-восточном и субмеридиональном направлении под влиянием арктического спрединга.

Подтверждена независимость формирования Оленекского поднятия и влияние арктического спрединга (хребет Гаккеля) на формирование обрамляющих с северной стороны Оленекского поднятия структур. Структур, которые находятся в пределах прибрежной зоны моря Лаптевых.

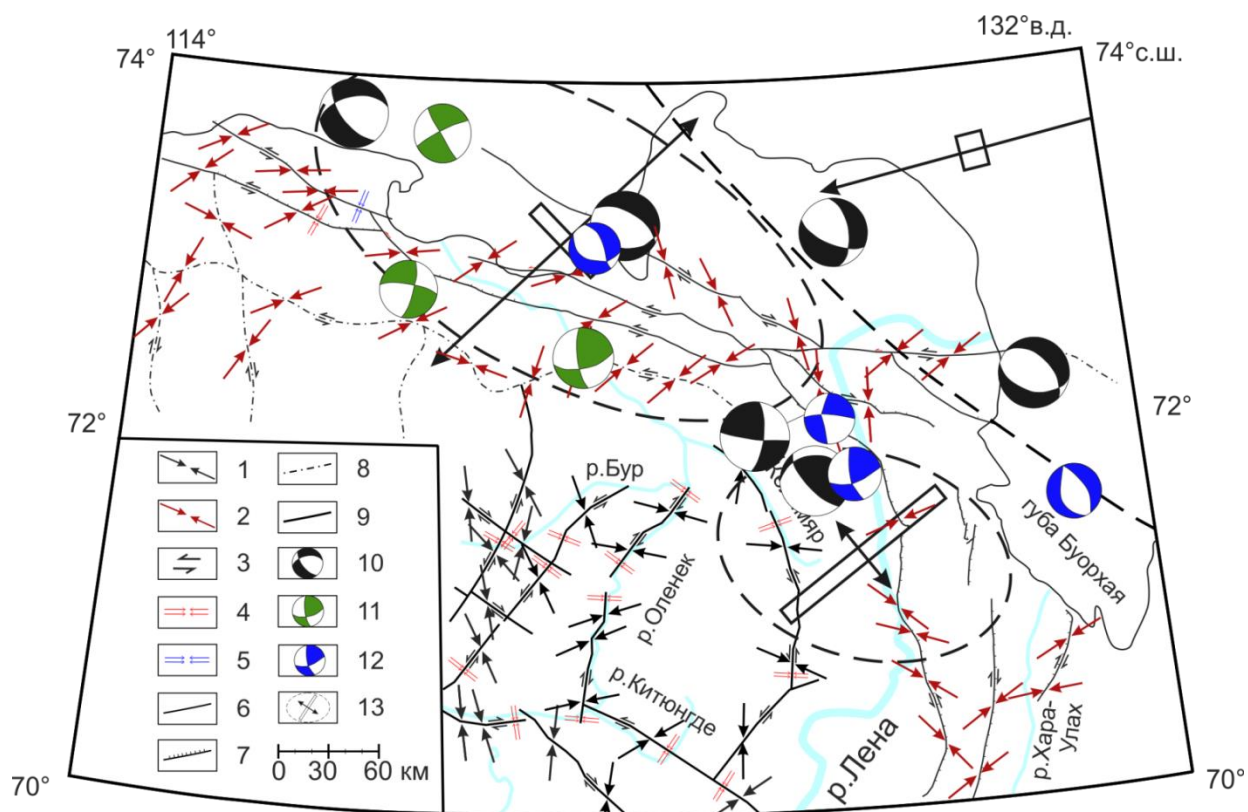


Рисунок 6. Схема геодинамики прибрежной части моря Лаптевых, рассчитанная с помощью SimSGM [Гордеев, 2019].

1 – главные оси сжатия [Сим, 2018]; 2 – главные оси сжатия (данное исследование); 3 – направление сдвига; обстановки дополнительного: 4 – сжатия, 5 – растяжения; 6 – разрывы нового исследования; 7 – сброс; 8 – погребенные разрывы; 9 – разрывы [Сим, 2018]; механизмы очагов землетрясений: 10 – Imaev et al, 2017; 11 – [Grachev et al, 2003]; 12 – [Engen et al, 2003]; 13 – горизонтальные проекции главных осей деформации (растяжение, сжатие) [Imaev et al, 2017].

В исследовании использованы механизмы очагов землетрясений (МОЗ), анализ которых показал (рис. 6): 1. Из 13 использованных МОЗ 6 сбросовых, 6 сдвиговых, 1 взбросовое. 2. Двигаясь от шельфа вглубь континента определения МОЗ изменяются со сбросовых на сдвиговые; 3. Сбросовые МОЗ связаны с развитием Хребта Гаккеля и слабым проявлением рифтовых структур в шельфе. 4. Сдвиговые МОЗ проявляются вдоль разрывных структур с подтвержденной сдвиговой кинематикой. 5. Взбросовый МОЗ приурочен к области поднятия кряжа Чекановского.

Определено напряженно-деформированное состояние северо-восточной окраины Сибирской платформы:

- Впервые построена подробная схема геодинамики масштаба 1:500 000 на прибрежный район северо-востока Сибирской платформы;

- Выявлено влияние арктического спрединга на прибрежную часть, включая Кряж Чекановского;
- Выявлено унаследованное развитие структуры вала под Кряжем Чекановского;
- Выявлена особенность распределения МОЗ: сбросовое-сдвиговое; шельф-континент;
- Программное обеспечение SimSGM успешно апробировано на новой территории (проведено сравнение полученной кинематики разрывных структур программным путем с результатами геологической съемки. По трем известным разрывам 100% сходство).

3.2.3. Внутриплатформенный самостоятельный механизм формирования структур Оленекского и Мунского поднятий

Схема геодинамики Лено-Оленекского междуречья (рис. 7) составлена по двум топокартам масштаба 1:500 000, на которых предварительно были выделены линеаменты как элементы новейшей структуры. Линеаменты, по мнению автора, являются зонами повышенной трещиноватости. Анализ схемы показывает, что в пределах новейшего Оленекского поднятия ориентировки осей сжатия I ранга стремятся к радиальному положению, а оси сжатия II ранга, характеризующие более мелкие разрывные нарушения, скорее, разнонаправлены. Это свидетельствует о том, что поднятие, зародившееся еще в протерозое и унаследованно развивающееся на разных этапах геологической истории района исследования, продолжает активно расти и в настоящее время. Рост поднятия вызывает его радиальное «растрескивание». Морфология локальных структур в пределах Оленекского поднятия также говорит об определенных обстановках их формирования. Так, например, в центральной и восточной частях локальные поднятия занимают концентрическое положение, как-бы последовательно оконтуривая центр свода, при этом они имеют относительно симметричное строение. Это, по нашему мнению, связано непосредственно с независимым ростом основного свода, и поэтому равномерным распределением тектонических напряжений в пределах его центра. В то же самое время на западной периферии свода в долине р. Оленек, пересекающей поднятие с юга на север, хорошо выражены коленообразные участки русла, вероятно, заложенные по современным закономерно развитым тектоническим трещинам. Такой рисунок свидетельствует об их сдвиговой природе. Вдоль этой зоны установлен правый сдвиг по методике Л.А. Сим [1991]. Кулисное сочленение локальных поднятий на левом и правом берегах Оленека также предполагает участие сдвиговых напряжений при их образовании. Однако их левосдвиговый рисунок не согласуется с правосдвиговой кинематикой по

предполагаемому разлому. Тем не менее мы предполагаем, что долина Оленека заложена по новообразованному новейшему сдвигу.

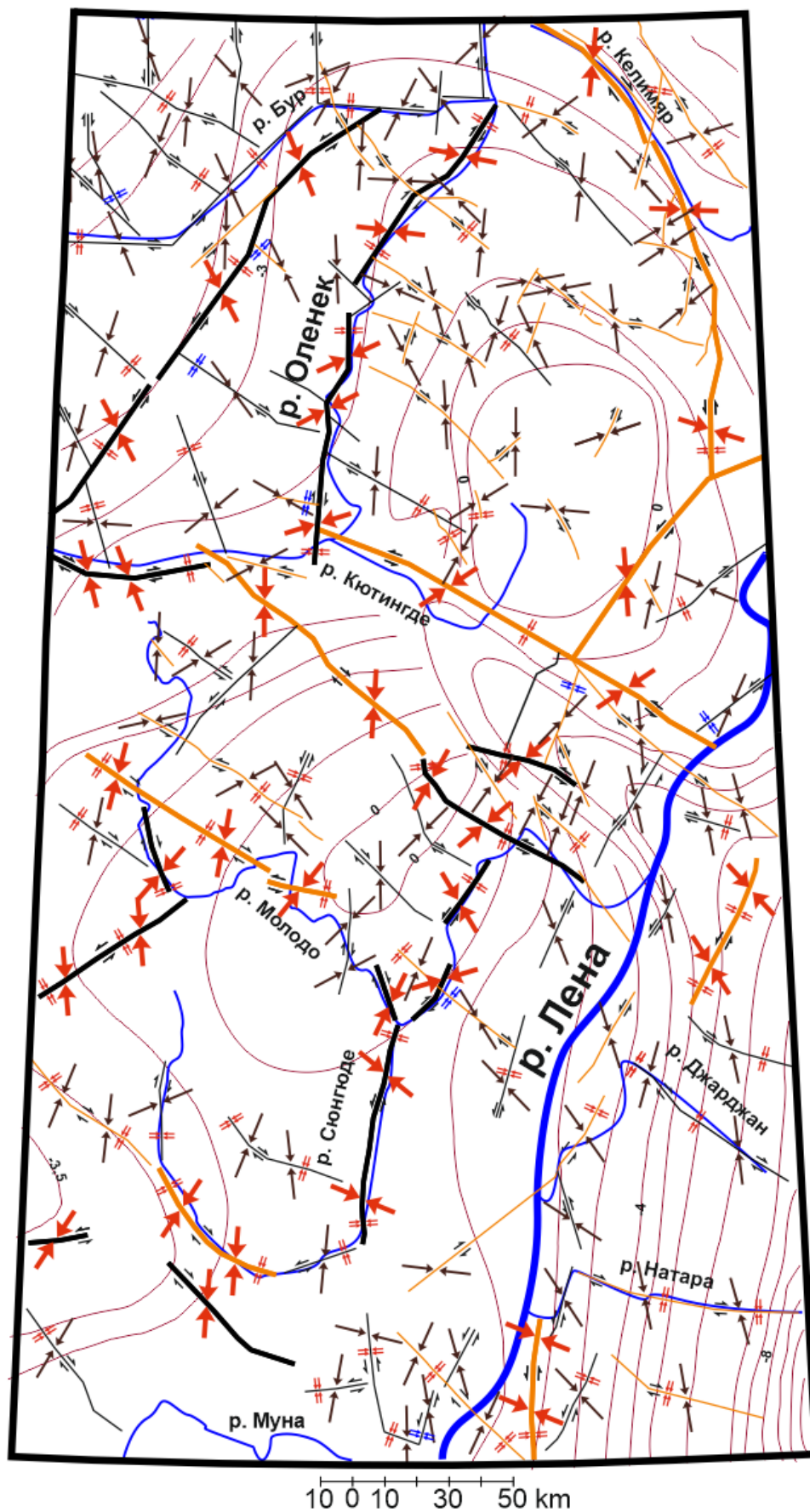


Рисунок 7. Схема геодинамики Оленекского поднятия и его структуро-обрамления.

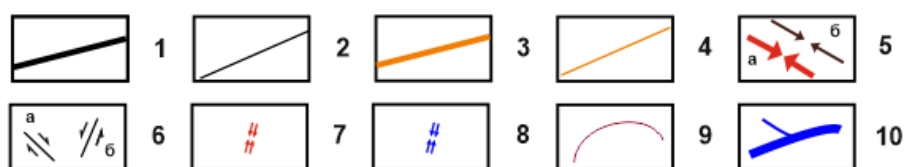


Рисунок 7. Схема геодинамики Оленекского поднятия и его структуро-обрамления.
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

1 – линеаменты 1 ранга; 2– линеаменты 2 ранга; 3 – разрывы 1 ранга; 4 – разрывы 2 ранга; 5 – а. главные оси сжатия 1 ранга, б. главные оси сжатия 2 ранга; 6 – а. правый сдвиг, б. левый сдвиг; 7 – условия дополнительного сжатия; 8 – условия дополнительного растяжения ; 9 – поверхность фундамента; 10 – упрощенная гидросеть.

В основании чехла лежат кембрийские отложения, обнажающиеся на левобережье р. Оленек (рис. 8). Над крупными древними Оленекским и Мунским сводами унаследованно развиваются Оленекское и Мунское поднятия; в пределах древнего Оленек-Анабарского прогиба выделились Бурская и Келимярская впадины, разделенные разрастающимся на новейшем этапе Оленекским сводом; над Кютингдинским грабеном развит одноименный прогиб.

Автором поднимается серьезная проблема реконструкции неотектонических напряжений исследуемого региона, которая заключается в генезисе избыточных напряжений горизонтального сжатия, которая также остро стоит перед горняками, в частности, на Кольском полуострове. Эти напряжения также связывают с проявлением дальнедействующего давления от границ литосферных плит. Альтернативой этому мнению является точка зрения о действии остаточных напряжений предыдущих эпох. Длительное существование в породах верхних слоев коры остаточных явлений гравитационного напряженного состояния (ГНС) Ю.Л. Ребецкий [Ребецкий, 2008] объясняет присутствием внутренних литосферных процессов, происходящих в коре орогенов, щитов и плит. К ним относятся вертикальные восходящие перемещения, вызванные соответствующими движениями на подошве коры или литосферы. Сопутствующие им экзогенные процессы приводят к упругой разгрузке остаточных горизонтальных гравитационных напряжений, вызванной эксгумацией пород при воздымании поверхности. На основе величины эрозии Фенноскандинавского щита за мезозой–кайнозой [Сим, 2012] оказалось возможным рассчитать величину избыточных напряжений горизонтального сжатия в массиве горных пород при действии только массовых (гравитационных) сил в породах Кольского полуострова. Расчетная величина соизмерима с величинами современных напряжений, измеренных в Хибинском и Ловозерском массивах [Ребецкий и др., 2017]. Таким образом, устойчивое воздымание

Оленекского и Мунского поднятий с протерозоя можно объяснить разгрузкой «разряжающихся» гравитационных горизонтальных напряжений. Рост этих поднятий обусловил радиально расходящиеся оси сжатия. Продолжающийся рост Оленекского поднятия вызвал разделение древнего Оленек-Анабарского прогиба на Бурскую и Келимярскую впадины, а также смещение оси Кютингдинского новейшего прогиба на юго-запад относительно оси Кютингдинского древнего грабена.



Рисунок 8. Кембрийские отложения в основании чехла Оленекского поднятия на его юго-западном склоне. Левый берег р. Оленек, в 6 км ниже устья р. Чукусун. Фото Б.Б. Кочнева.

3.2.4. Влияние орогенеза в Верхоянье на платформенные неотектонические напряжения

Параграф написан с использованием материалов [Сим Л.А., Гордеев Н.А., Маринин А.В., 2018].

На основе полученных реконструкций неотектонических напряжений восточной части Сибирской платформы автор устанавливает наличие влияния новейшего орогенеза Верхоянья на формирование неотектонических структур платформы. По построенным картам неотектоники выделяется субмеридиональная зональность поднятий-впадин, а по построенной карте новейших тектонических напряжений выделяется большое количество субширотно ориентированных осей сжатия по мере продвижения с востока на запад. На территории Сюнгюдинского и Мунского поднятий наблюдается формирование куэстового рельефа, что также свидетельствует на наведённые напряжения от развития Верхоянского хребта.

Заключение

В заключении кратко описан результат проведенных геологических исследований. Была изучена история формирования и развития структуры Оленекского поднятия и

структур, которые его обрамляют. При этом был использован комплекс различных методов, в том числе, геологических, структурно-геоморфологических, тектонофизических, а так же дешифрирование и анализ линеаментов. Были получены следующие результаты и сделаны важные выводы:

1. Впервые охарактеризованы неотектоника и неотектонические напряжения северо-востока Сибирской платформы, которые характеризуются сдвиговым типом. Оно характеризуется субмеридиональным сжатием.
2. Установлено влияние орогенеза в Верхоянье на тектонические напряжения СВ Сибирской платформы, которое незначительно распространяется на платформу и составляет 17% от всех восстановленных ориентаций осей сжатия неотектонических напряжений.
3. Влияние процессов в Арктическом бассейне на неотектоническом этапе не распространяется дальше Лаптевоморского побережья, Кряжа Чекановского, северо-востока Сибирской платформы.
4. На северо-востоке выявлены структуры с внутриплатформенными источниками тектонических напряжений: Оленекский и Мунский унаследованные неотектонические поднятия с радиально ориентированными субгоризонтальными осями сжатия.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Гордеев Н.А.**, Молчанов А.Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим // Геоинформатика. 2019. №2. С. 25-33. (Импакт-фактор в РИНЦ 0,431).
2. Сим Л.А., Маринин А.В., Брянцева Г.В., **Гордеев Н.А.** Результаты изучения тектонических напряжений в регионах Северной Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 771–800. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0371. (Импакт-фактор в РИНЦ 0,828).

Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

1. Сим Л.А., **Гордеев Н.А.**, Маринин А.В. Новейшая геодинамика восточной окраины Сибирской платформы // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 4. С. 280–289. (Импакт-фактор в РИНЦ 0,583).