

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 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

**Научный руководитель** **Сим Лидия Андреевна** – доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, ведущий научный сотрудник лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики им. М.В. Гзовского.

**Официальные оппоненты:** **Кожурин Андрей Иванович** – доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории активной тектоники и палеосеймики.

**Тверитинова Татьяна Юрьевна** – кандидат геолого-минералогических наук, ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, доцент кафедры региональной геологии и истории Земли.

**Ведущая организация:** **ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет.**

Защита диссертации состоится **14 октября 2021 г.** в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 002.001.01 Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта по адресу: г. Москва, Большая Грузинская ул., д.10, стр.1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института [www.ifz.ru](http://www.ifz.ru). Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации [vak.ed.gov.ru](http://vak.ed.gov.ru) и на сайте ИФЗ РАН.

Отзыв на автореферат, заверенные подписью и печатью, в 2-х экземплярах просьба направлять по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » августа 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Работа посвящена *реконструкции тектонических напряжений, характеризующих новейшее напряженное состояние и геодинамику северо-восточной части Сибирской платформы.*

К настоящему времени было проведено много исследований по изучению неотектоники северо-востока Сибирской платформы [Грачев, 1996; Николаев, 1979; Фролов, 2015; Конторович, 2013; Поляков, 2011; Граханов, 2007-2010, 2010ф; Галабала, 1970, 1992; Имаев, 1998, 2000, 2016, 2017], несмотря на это, неотектонические напряжения остаются изучены слабо [Шерман, 2010]. Это объясняется рядом причин: слабой сейсмичностью региона (исключение составляет Лаптевоморский шельф [Грачев, 2003; Имаева, 2016; Имаев, 2017; Engen et al, 2003]), а также труднодоступностью территории для полевых исследований. Обойти вышеперечисленные ограничения и получить данные о неотектоническом структурном плане региона и напряжениях позволяет последовательное применение двух методов, обладающих дистанционными технологиями исследований. Оба метода имеют одинаковое название «Структурно-геоморфологический» и используют в качестве основных исходных данных топографические карты, аэро- и космоснимки. Первый из них [Макаров, 1997; Костенко, 1999] позволяет оценивать интенсивности вертикальных движений и амплитуды эрозии поверхности, а второй тектонофизический выполняет реконструкцию сдвиговых неотектонических напряжений [Сим, 1991; Ребецкий, Сим, Маринин, 2017]. Диссертант принимал участие в разработке программного обеспечения SimSGM [Гордеев, Молчанов, 2018; 2019; 2020; Молчанов, Гордеев, 2021], которое в значительной степени ускоряет реконструкцию сдвиговых неотектонических напряжений [Сим, 1991]. В результате исследований впервые установлены закономерности новейшего поля напряжений северо-востока Сибирской платформы, которые позволили локализовать три крупных структурных плана: (1) платформенный (внутриплатформенные источники напряжений), (2) побережье моря Лаптевых (сложнопостроенный участок, зажатый между платформенными напряжениями и напряжениями, связанными с процессами спрединга в Арктике (хребет Гаккеля)) и (3) Верхоянский хребет (напряжения, возникающие в процессе интенсивного роста горных цепей Верхоянья в новейший период).

**Цель исследования:** определить геодинамические условия формирования новейших структур северо-востока Сибирской платформы и влияние на них спрединга хребта Гаккеля.

Поставленная цель определяет **задачи исследования.**

1. Изучение литературных и фондовых данных по неотектонике и геологии района.
2. Составление схем новейшей тектоники территории исследования.

3. Разработка компьютерной программы для реконструкции тектонических напряжений структурно-геоморфологическим методом Л.А. Сим.
4. Составление схем новейшего напряженного состояния.
5. 3D визуализация новейших структур с целью создания геологической модели.
6. Сопоставление полученных схем новейших напряжений со схемами неотектоники.
7. Составление схемы геодинамики территории исследования.

**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, выполнявшихся с 2014 по 2021 годы. В основу диссертации положены результаты структурно-геоморфологического дешифрирования космоснимков и топографических карт масштабов 1:500 000 и 1:1 000 000, материалы Государственных Геологических съемок [ГГК, R-(50)-52, 1975; ГГК, S-50, S-51, S-52, 2011; ГГК, R-51, 2013; ГГК, R-52, 2015] масштаба 1:1 000 000, фондовые отчеты, а также опубликованные данные по геологии изучаемого района, тектонике и другим направлениям.

**Кратко о применяемых методах.** В настоящей работе применяется комплекс методов исследования: структурно-геоморфологический анализ территории [Макаров, 1997; Костенко, 1999], построение геоморфологических профилей, дешифрирование карт и космоснимков, линеаментный анализ [Полетаев, 2001], 3D геологическое моделирование и метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений [Сим, 1991]. Последний метод автоматизирован с помощью языка программирования Python. Написана программа SimSGM [Гордеев, Молчанов, 2019; Молчанов, Гордеев, 2020, 2021], в основе которой лежат технологии компьютерного зрения.

**Личный вклад автора** заключается в следующем. Построены схемы новейшей тектоники и неотектонических напряжений масштабов 1:500 000 и 1:1 000 000. Разработаны и затем усовершенствованы алгоритмы программного обеспечения для реконструкции сдвиговых неотектонических напряжений по структурно-геоморфологическому (тектонофизическому) методу Л.А. Сим [1991]. Создана трёхмерная визуализация начальной геологической модели для установления наследственной связи между древними и новейшими структурами. Выполнен сбор материала по новейшему строению Оленёкского поднятия, осуществленный при непосредственном участии диссертанта в полевой экспедиции 2014 года. Основные результаты отражены в научных журналах: [Сим, Гордеев, Маринин, 2018], [Сим, Маринин, Брянцева, Гордеев, 2018], [Гордеев, Молчанов, 2019], также в 29 работах (сборники статей, тезисы докладов).

**Научная новизна.** На основе проведенных построений выявлены главные источники новейших напряжений на северо-востоке Сибири. Обнаружена граница распространения наведенных напряжений сжатия от процессов пропации хребта Гаккеля [Гордеев, Сим, 2020; Гордеев, Сим, 2021]. Выявлены внутриплатформенные источники напряжений в области развития Оленёкского и Мунского поднятий [Сим, 2019; Гордеев, Сим, 2020; Гордеев, Сим, 2021].

Разработанный программный пакет SimSGM позволяет существенно упростить и ускорить реконструкцию сдвиговых напряжений структурно-геоморфологическим методом Л.А. Сим за счёт применения современных технологий компьютерного зрения, которые не использовались ранее для решения подобных задач. Введена возможность обработки спутниковых изображений, цифровых моделей рельефа, автоматический поиск мегатрещин и их статистическая обработка в реальном времени (процентное соотношение определений по палетке М.В. Гзовского, построение роз-диаграмм простираний мегатрещин).

**Теоретическая и практическая значимость** приведенных результатов заключается в установленных впервые характеристиках неотектонического напряженного состояния северо-востока Сибирской платформы. С помощью новых данных, полученных в работе, стало возможным обосновать локализацию внутриплатформенных источников напряжений на северо-востоке Сибири.

В результате проведенных работ были сформулированы **три 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 в виде наведенных напряжений.
3. Оленекский и Мунский своды развились в новейший этап из-за внутриплатформенных тектонических напряжений и, в свою очередь, являются источниками напряжений для структур обрамления.

**Апробация результатов исследований.** Результаты проведенных исследований были представлены на Тектоническом совещании XLVIII (2016 г.), L (2018 г.), LI (2019), LII (2020г.), на Всероссийской научной конференции "Актуальные проблемы динамической геологии при исследовании платформенных областей" (2016 г.), Четвертой тектонофизической конференции в ИФЗ РАН "Тектоника и актуальные вопросы наук о Земле", научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН (2017-2020 гг.), XV Ферсмановской научной сессии (ФНС), посвященной 100-летию со дня рождения д.г.-м.н. Е.К. Козлова (2018 г.), на ФНС ГИ КНЦ РАН (2019 и 2021 гг.), VIII Российской

молодёжной научно-практической школе "Новое в познании процессов рудообразования" (2018 г.), Международной юбилейной научной конференции «Воздействие внешних полей на сейсмический режим и мониторинг их проявлений» (2018 г.), XXV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, "Ломоносов – 2018" (2018 г.) и "Ломоносов-2019" (2019 г.), (2021 г.), 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.). Итого 16 тезисов докладов, 13 статей в сборниках.

Научные результаты, полученные в диссертации, отражены в 32-х 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, 2-х работах, индексируемых системой РИНЦ и 1-ой работе - системами РИНЦ и SCOPUS.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация общим объемом 120 страниц состоит из трёх глав, введения, заключения, иллюстрирована 44 рисунками и 1 таблицей. Список литературы включает 139 наименований. Работа выполнена в лаборатории фундаментальных и прикладных проблем тектонофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

**Благодарности.** Соискатель 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. Сухановой Татьяне Владимировне за руководство и советы при написании диссертации, сотрудникам ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта: Ребецкому Юрию Леонидовичу и Маринину Антону Витальевичу за обучение тектонофизическим методам исследования (полевым и камеральным) и за предоставленные материалы. Также автор благодарит профессора кафедры динамической геологии Дубинина Евгения Павловича за возможность дополнительных геодинамических исследований Лаптевоморского региона в лаборатории геодинамики МГУ им. М.В. Ломоносова. Отдельная благодарность Яковлеву Федору Леонидовичу за внимательное ознакомление и конструктивные замечания по диссертации.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

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 **главе** охарактеризованы география, изученность и геологическое строение района. Представлена орографическая характеристика территории исследования, описана эрозионная сеть региона. 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, 1985; 1988-1992 гг.,ф] до современных исследований небольшими группами [Имаев, 1998; Граханов, 2010ф; Шерман, 2010; Поляков, 2011; Имаева и др., 2016; Имаев и др., 2000]. Дана характеристика стратиграфии четвертичных и дочетвертичных образований, тектоники и магматизма северо-востока Сибирской платформы. При описании стратиграфии дочетвертичных образований использованы материалы геологических съемок [ГГК РФ..., 2013; ГК СССР..., 1975; ГК СССР..., 1965; Об.записка, 1960; Пуминов, 1960; ГГК, R-(50)-52, 1975; ГГК, S-50, S-51, S-52, 2011; ГГК, R-51, 2013; ГГК, R-52, 2015]. В геологическом строении Лено-Оленёкского междуречья принимают участие отложения нескольких структурных этажей, различающихся характером распространения, мощностью, вещественным составом и другими признаками. Нижний, наиболее древний этаж, составляет фундамент платформы и имеет протерозойский возраст. Вышележащие этажи, начиная с рифейского, объединяют осадочные, осадочно-вулканогенные и магматические породы с возрастным диапазоном от верхнего протерозоя (рифей) до кайнозоя включительно и формируют плитный чехол. При описании стратиграфии четвертичных образований использованы материалы геологических съемок [Геол. карта..., 1960; Галабала, 1988-1992 гг. ф; Граханов, 2007] и фондовые материалы [Граханов, 2010ф]. Рыхлые или неконсолидированные четвертичные отложения на территории исследования развиты повсеместно. Они представлены разнообразными генетическими типами и фациальными разновидностями пород. 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 классических (традиционных) и современных методов исследования.

Результаты выявления новейших структур и построения карты новейшей тектоники 1:500 000 и 1:1 000 000 получены путём геоморфологического анализа рельефа и обобщения литературных данных. При изучении геоморфологического строения рассматриваемой территории использован метод, разработанный Макаровым В.И. и Костенко Н.П. [Макаров, 1997; Костенко, 1999]. В качестве основного метода исследования новейших структур использовался структурно-геоморфологический анализ, который позволяет выявить связь рельефа с неотектоническими, в том числе, современными движениями. Метод применялся как в полевых, так и в камеральных условиях. На основании проведенного структурно-геоморфологического анализа на топографических картах выделены и изучены новейшие структуры в пределах Лено-Оленекского междуречья. Привлечены данные предшествующих исследователей по новейшей тектонике северо-востока Сибирской платформы [Галабала, 1970; 1985; 1988-1992 гг., ф; Ким, 1985].

Для установления взаимосвязи между глубинными и новейшими структурами проведено 3D геологическое моделирование и изучение геологических карт и разрезов. На основе программных пакетов ArcGis, Global-Mapper оцифрованы геологические, топографические карты, тектонические схемы. В дальнейшем были созданы базы данных в разных форматах. Загруженные базы данных были переработаны в 3D модель.

Для проведения геодинамического анализа территории исследования применен тектонофизический структурно-геоморфологический (СТ) метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений, базирующийся на принципах тектонофизического моделирования [Сим, 1991]. Он основан на дешифрировании всех прямолинейных элементов рельефа, т.н. мегатрещин, вблизи предполагаемого или откартированного разрывного нарушения. Для дешифрирования используются топографические карты, космические и аэрофотоснимки, выбор масштаба которых зависит от конкретных геологических задач. СТ метод основывается на: а) повсеместном развитии крутопадающих плоскостей разломов в осадочном чехле платформ, требующих сдвигового поля напряжений; б) горизонтальном положении оси сжатия вблизи дневной поверхности (где практически отсутствует литостатическое давление); в) данных физического [Михайлова, 2007] и математического [Ребецкий, 1987] моделирования, которые показывают, что в осадочном чехле над сдвигом в фундаменте образуется два локальных максимума касательных напряжений – непосредственно над фундаментом (наибольший) и вблизи дневной поверхности.

Автоматизация реконструкций неотектонических напряжений и разработка программы SimSGM. К настоящему моменту в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН разработан и успешно применяется программный пакет "SimSGM", позволивший автоматизировать структурно-геоморфологический (СТ) метод реконструкции сдвиговых

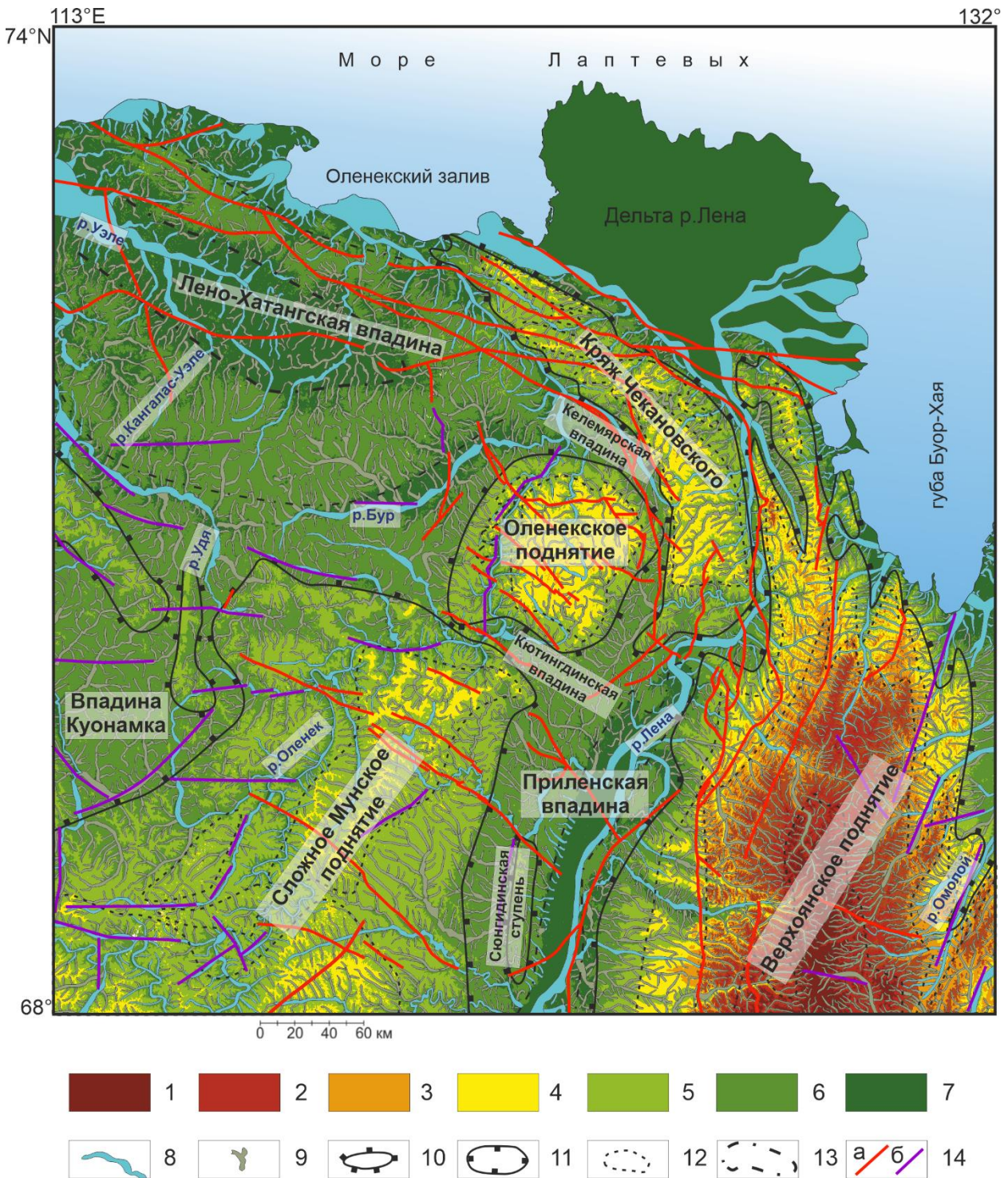


тектонических напряжений Л.А. Сим [Сим, 1991, 2000; 2011; Гордеев, 2019]. Последние усовершенствования программы направлены на: 1) применение автоматических алгоритмов для регионов с отсутствующими картами высот надлежащего качества, 2) выбор наиболее оптимальных алгоритмов автоматизации дешифрирования линеаментов, 3) создание удобного пользовательского интерфейса программы.

На сегодняшний день в программном обеспечении “SimSGM” реализована возможность автоматического анализа как карт высот, так и спутниковых снимков при использовании четырёх различных алгоритмов компьютерного зрения для дешифрирования линеаментов. Реализован алгоритм фильтрации ложных линеаментов антропогенного происхождения [Гордеев, 2020; Молчанов, 2021]. В работе приводится описание и сравнение данных алгоритмов в контексте поставленной задачи дешифрирования [Гордеев, 2019].

### **ГЛАВА 3. Новейшая тектоника и геодинамические реконструкции**

В этой главе дана характеристика новейшего структурного плана исследуемой территории (рис. 1), основанная на работах, приходящихся, главным образом, на конец XX века [Галабала, 1970, 1985, 1988-1992; Ким, 1985; Имаев, 2017, 2016, 2013]. Дана оценка масштабности работ по новейшей тектонике: так, например, на картах новейшей тектоники Н.И. Николаева [1979] и А.Ф. Грачева [1996] Оленёкское поднятие показано обобщенно – в виде двух структур с амплитудами поднятий 200-300 м, разделенных зоной прогиба, а обрамляющие Оленёкское поднятие структуры на юге и востоке практически не дифференцированы. Самая детальная информация дана в работе [Галабала, 1970] с масштабом 1:1 000 000. Начало новейшего этапа для территории исследования приурочено к поднятию Верхоянья и приходится на олигоцен [Галабала, 1970]. Некоторое затухание движений отмечается в миоцене, тогда как для платформенных структур в это время происходит активизация поднятий и формирование отложений, обрамляющих Оленёкское и Мунское поднятия. Параллельно идет развитие Кютингдинской впадины. Для Лено-Анабарского прогиба установлено формирование осадков неоген-четвертичного времени [Ким, 1985]. В плиоцене отмечается относительно спокойное воздымание структур, которое с начала четвертичного времени снова становится более интенсивным в изучаемом регионе [Галабала, 1985]. В среднечетвертичное время снова отмечен этап выравнивания территории, который продлился недолго из-за распространения Сартанского оледенения [Галабала, 1970].



**Рис. 1.** Схема новейших пликативных и дизъюнктивных структур Лено-Оленекского междуречья и структур его обрамления. Составили [Гордеев, Сим, 2021].

1-7 – Амплитуды поднятий: 1 – 900->1500 м; 2 – 600-900 м; 3 – 450-600 м; 4 – 350-450 м; 5 – 250-350 м; 6 – 150-250 м; 7 – 10-150 м; 8-9 – формы рельефа: 8 – долины крупных рек; 9 – эрозионная сеть; 10-13 – новейшие структуры: 10 – основные поднятия; 11 – впадины; 12 – локальные поднятия; 13 – изогипсы впадин; 14 – разрывные нарушения: а – по геол.картам [ГТК, R-(50)-52, 1975; ГТК, S-50, S-51, S-52, 2011; ГТК, R-51, 2013; ГТК, R-52, 2015], б – линеаменты с разрывной кинематикой (новейшие ослабленные зоны)

**Выводы по главе 3.** В неотектонической структуре территории Лено-Оленёкского междуречья отчетливо выделяются две разноплановые области – северная и южная. В новейшее время произошла перестройка структурного плана территории. Древний Оленёкский свод после продолжительного платформенного этапа, прерываемого вспышками магматизма [ГГК РФ..., 2013; ГК СССР..., 1965], был унаследован новейшим одноименным поднятием (рис. 2). На месте древних прогибов сформировались: на Лаптевоморском побережье на Лено-Анабарском прогибе – поднятие кряжа Чекановского, между Оленёкским и Мунским сводами над Кютингдинским грабеном – Кютингдинская впадина, на северо-западном крыле Оленёкского поднятия над Лено-Анабарским прогибом – Бурская впадина, на северо-восточном крыле Оленекского поднятия – Келимярская впадина. На месте Муно-Сюнгюдинского междуречья сформировалось субмеридионально вытянутое сложное Мунское поднятие, восточное крыло которого входит в состав Ленского прогиба. Последний развивается унаследовано на западном склоне древнего Предверхоянского прогиба, в то время как центральная и восточная части этого прогиба втянуты в инверсионное поднятие Верхоянского хребта.

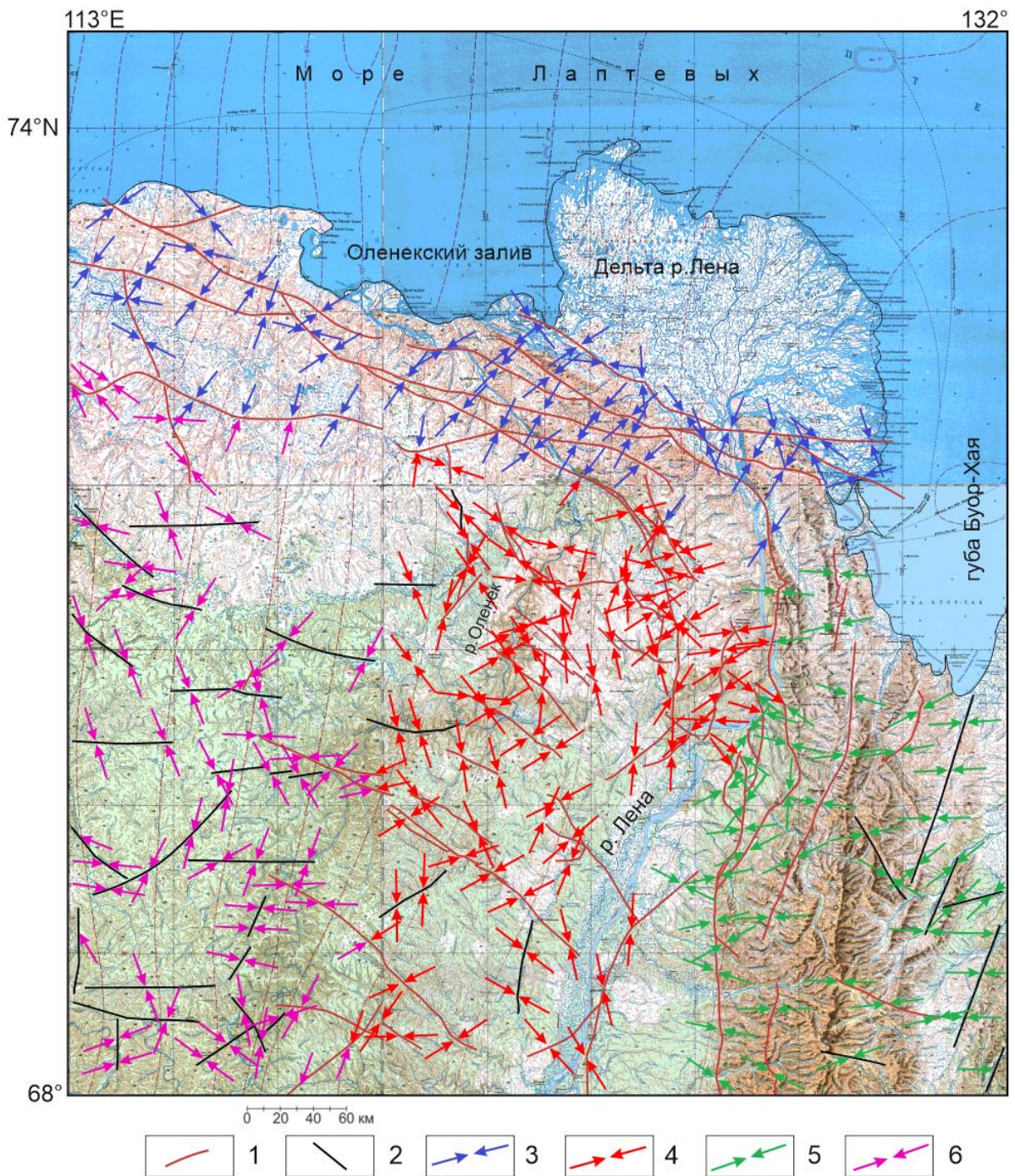
## **ГЛАВА 4. Реконструкция полей напряжения и геодинамические реконструкции**

### 4.1. Общая характеристика напряженного состояния

В этом разделе дана характеристика восстановленных локальных стресс-состояний с применением структурно-геоморфологического (СГ) метода анализа вторичных нарушений, сопряженных с основным разломом [Сим Л.А., 1991]. В качестве разломов были использованы как достоверные, так и предполагаемые разрывные нарушения, выделенные по данным Геологической карты [ГГК, R-(50)-52, 1975; ГГК, S-50, S-51, S-52, 2011; ГГК, R-51, 2013; ГГК, R-52, 2015], а также предполагаемые молодые сдвиги, выделенные по геоморфологическим признакам. Все разломы прошли ранжирование, и по ним были определены их новейшая кинематика и ориентация осей сжатия и растяжения.

Схема новейших напряжений всего района исследований (рис. 2) составлена по четырем топографическим картам масштаба 1:1 000 000, на которых предварительно были выделены все известные по разным источникам [ГГК, R-(50)-52, 1975; ГГК, S-50, S-51, S-52, 2011; ГГК, R-51, 2013; ГГК, R-52, 2015] разрывы как элементы основной структуры.

Для того чтобы охарактеризовать общее поле напряжений территории исследований, в работе проведен детальный линейный анализ, включающий построение роз-диаграмм [Трещиноватость ..., 2008] по разным параметрам геологических структур, а также осей сжатия 1 и 2 рангов.



**Рис. 2.** Схема новейших тектонических напряжений северо-востока Сибирской платформы.

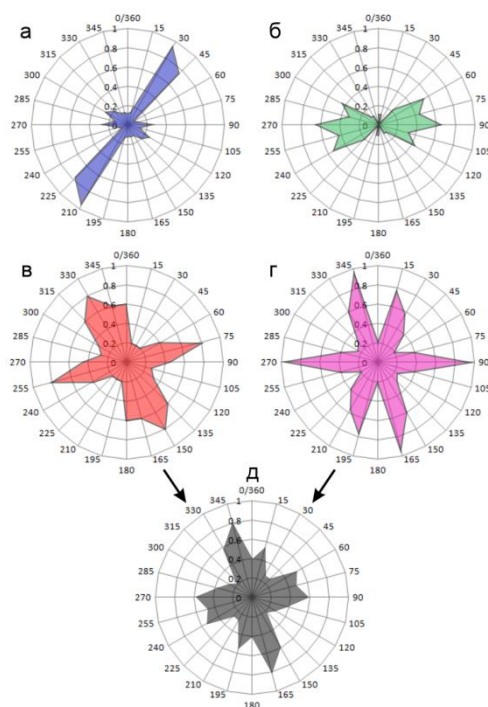
Масштаб: 1: 1 000 000. Составили [Гордеев, Сим, 2021].

1 – Разрывы; 2 – линеаменты; 3 – оси сжатия, приуроченные к Лаптевоморской области; 4 – оси сжатия (центральная область); 5 – оси сжатия, приуроченные к Верхоянью; 6 – оси сжатия (западная область)

**Выводы по разделу 4.1.** На рис. 2 выделены 4 поля напряжения второго ранга, состоящие из закономерно связанных групп реконструированных локальных стресс-состояний: (1) в области развития кряжа Чекановского и Лаптевоморского побережья, (2) в Верхоянье, (3) в области развития сводовых поднятий – Мунского и Оленёкского

(центральная область) и (4) в западной области. В результате суммирования осей напряжений платформенной области установлено преобладание субмеридионального сжатия на всей территории платформы. Прочие отдельные стресс-состояния, являются локальными. Выделены следующие вторичные напряженные состояния. По Лаптевоморской области с кражем Чекановского: северо-восточным простираем 53-х локальных стресс-состояний (рис. 3, а). В Верхоянской области: с субширотным максимумом – по 48 измерениям (рис. 3, б). В центральной области с Оленёкским и Мунским поднятиями, характеризующимися неустойчивыми ориентировками осей сжатия: с субширотным и субмеридиональным максимумами с радиальной составляющей – по 78 измерениям (рис. 3, в). В западном регионе: с 2-мя субмеридиональными максимумами и одним субширотным – по 52 измерениям (рис. 3, г). Составленная обобщенная роза диаграмма по 129 измерениям на платформенной части в пределах западной и центральной областей характеризует основную площадь северо-востока Сибирской платформы (рис. 3, д).

Всего восстановленных осей сжатия 1 ранга – 222. Впервые дана характеристика напряженного состояния северо-востока Сибирской платформы.



**Рис. 3.** Розы-диаграммы реконструированных осей сжатия: а – Лаптевоморская область; б – Верхоянье; в – центральная область; г – западная область; д – суммарная для центральной и западной областей

Таким образом, сделан вывод о том, что сдвиговое поле напряжений всей территории северо-востока Сибирской платформы является субмеридиональным без учета краевых прогибов. Прогибы отличаются другими источниками напряжений. На основе этих

результатов **обосновано 1-е защищаемое положение: Новейшее поле напряжения северо-востока Сибирской платформы охарактеризовано как сдвиговое с региональным субмеридиональным сжатием.**

#### 4.2. Влияние спрединга в Арктике на напряженное состояние территории исследования

В разделе проанализированы геодинамические условия формирования новейших структур и их напряженно-деформированного состояния на северо-востоке Сибирской платформы. Раскрыт вопрос о влиянии Арктического спрединга на развитие ВСВ приморской части исследуемого района и кряжа Чекановского.

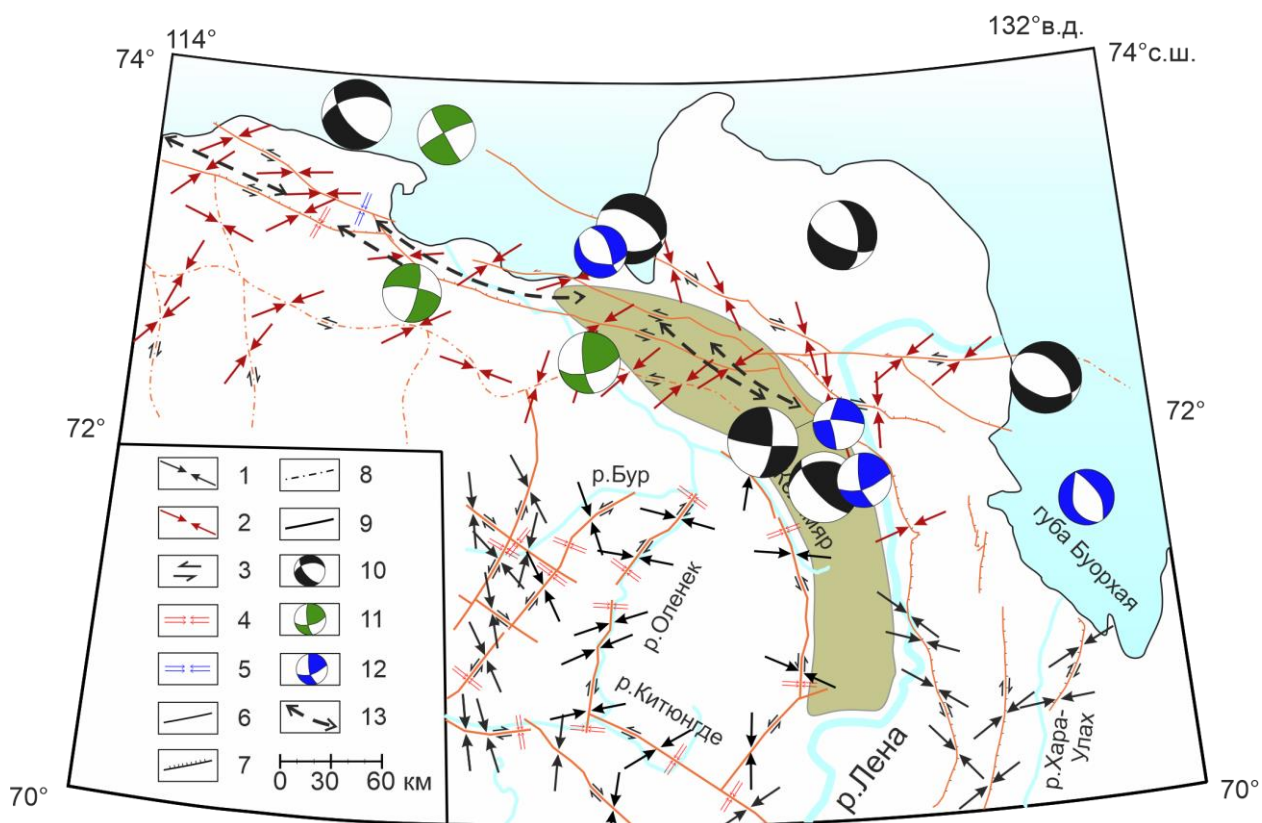
Проведенный тектонофизический анализ с применением программы SimSGM [Гордеев, Молчанов, 2018, 2019] показал большое количество локальных стресс-состояний с северо-восточной ориентировкой осей сжатия. Такое положение осей сжатия свойственно разломам субширотного направления с лево-сдвиговой кинематикой разломных структур на протяжении всего восток-северо-восточного участка Лено-Хатангского прогиба. Для разломов субмеридиональной ориентировки в частных случаях ось сжатия ориентирована на СЗ и ССЗ (р. Кангалас-Уэл на самом западе района, а также на западном участке разрыва, ограничивающего дельту р. Лена). Это связано с развитием небольших новейших впадин. Для субмеридиональных разломов Верхоянья свойственны оси сжатия с субширотной и северо-восточной ориентировками.

Проведен сравнительный анализ полученных результатов реконструкции с данными о решениях фокальных механизмов очагов землетрясений (МОЗ) [Имаев, Имаева, 2000; Имаева, Имаев, 2016; 2017], по которым сформулирована часть выводов по разделу.

Анализ 13-ти МОЗ показал (рис. 4), что 6 из них имеют кинематику сбросовых, 6 сдвиговых и 1 взбросовый. На шельфовой части МОЗ являются сбросовыми, на побережье – сдвиговыми. Сбросовые МОЗ связаны с развитием хребта Гаккеля и проявлением рассеянного спрединга на шельфе. Сдвиговые МОЗ проявляются вдоль разрывных структур с подтвержденной сдвиговой кинематикой (при помощи СГ метода). Взбросовый МОЗ приурочен к области поднятия кряжа Чекановского. Результаты реконструкций на Лаптевоморском побережье согласуются с большинством проекций осей главного сжатия в МОЗ.

Для определения действующих сил на Лаптевоморском шельфе, в диссертации проведено исследование геологических разрезов, по ним выделен тектонический вал, его ось ССЗ простирается отображена на (рис. 4). Он является крупной ограничивающей структурой, так как за его южными пределами развивается унаследованная Лено-Хатангская впадина.

Анализ геологических разрезов показал, что разрывообразование имеет тренд к уменьшению при отдалении от хребта Гаккеля на юг.



**Рис. 4.** Схема геодинамики прибрежной части Моря Лаптевых, рассчитанная с помощью SimSGM [Гордеев, 2019]. Составили [Гордеев, Сим, 2021].

1 – Главные оси сжатия [Сим, Гордеев, Маринин, 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; механизмы очагов землетрясений: 10 – [Imaeva et all, 2017]; 11 – [Grachev et all, 2003]; 12 – [Engen et all, 2003]; 13 – ось тектонического вала.

**Выводы по разделу 4.2.** Определено напряженно-деформированное состояние северо-восточной окраины Сибирской платформы:

1. Впервые построена подробная схема геодинамики масштаба 1:500 000 прибрежного района северо-востока Сибирской платформы.
2. Выявлено влияние арктического спрединга на прибрежную часть, включая край Чекановского.
3. Программное обеспечение SimSGM успешно апробировано на новой территории (проведено сравнение полученной кинематики разрывных структур программным путем с результатами геологической съемки. По трем известным разрывам [ГГК, S-50, S-51, S-52, 2011] отмечается 100% сходство).

4. Разрывообразование имеет тренд к уменьшению с севера на юг между хребтом Гаккеля и северо-востоком Сибирской платформы.
5. Реконструированные оси сжатия имеют общий тренд северо-восточного простираения (см. рис. 3).
6. Анализ МОЗ показал изменение геодинамического типа со сбросового на шельфе к сдвиговому на кряже Чекановского.

Эти выводы являются обоснованием 2-го защищаемого положения: **Влияние процессов спрединга в Арктическом бассейне на неотектоническом этапе распространяется только на развитие Кряжа Чекановского в виде наведенных напряжений.**

#### 4.3. Внутриплатформенный самостоятельный механизм формирования структур Оленёцкого и Мунского поднятий

В разделе 4.3. Лено-Оленекское междуречье охарактеризовано тектонофизически (рис. 5). По топографическим картам на схему новейших напряжений нанесены линеаменты, являющиеся зонами повышенной трещиноватости. Анализ схемы показал, что в пределах новейшего Оленёцкого поднятия ориентировки осей сжатия I ранга стремятся к радиальному положению, в то время как оси сжатия II ранга разнонаправлены. Эти данные указывают на унаследованный рост поднятия с палеозоя (верхний кембрий). Рост поднятия вызывает его радиальное растрескивание. Морфология локальных структур в пределах Оленёцкого поднятия показывает особенности его развития на новейшем этапе. Например, в центральной и восточной частях локальные поднятия занимают концентрическое положение, последовательно оконтуривая центр свода, при этом они имеют относительно симметричное строение. Это непосредственно связано с независимым ростом основного свода, и, следовательно, с равномерным распределением тектонических напряжений в пределах его центра. Одновременно на западной периферии свода, в долине р. Оленёк, пересекающей поднятие с юга на север, хорошо выражены коленообразные участки русла, вероятно, заложенные по современным тектоническим трещинам. Такой рисунок свидетельствует об их сдвиговой природе. Автор предполагает, что долина Оленёка заложена по новообразованному новейшему сдвигу.

В основании чехла лежат кембрийские отложения, обнажающиеся на левобережье р. Оленёк. Над крупными древними Оленёцким и Мунским сводами развиваются унаследованные Оленёцкое и Мунское поднятия; в пределах древнего Оленёк-Анабарского прогиба выделились Бурская и Келимярская впадины, разделенные разрастающимся на

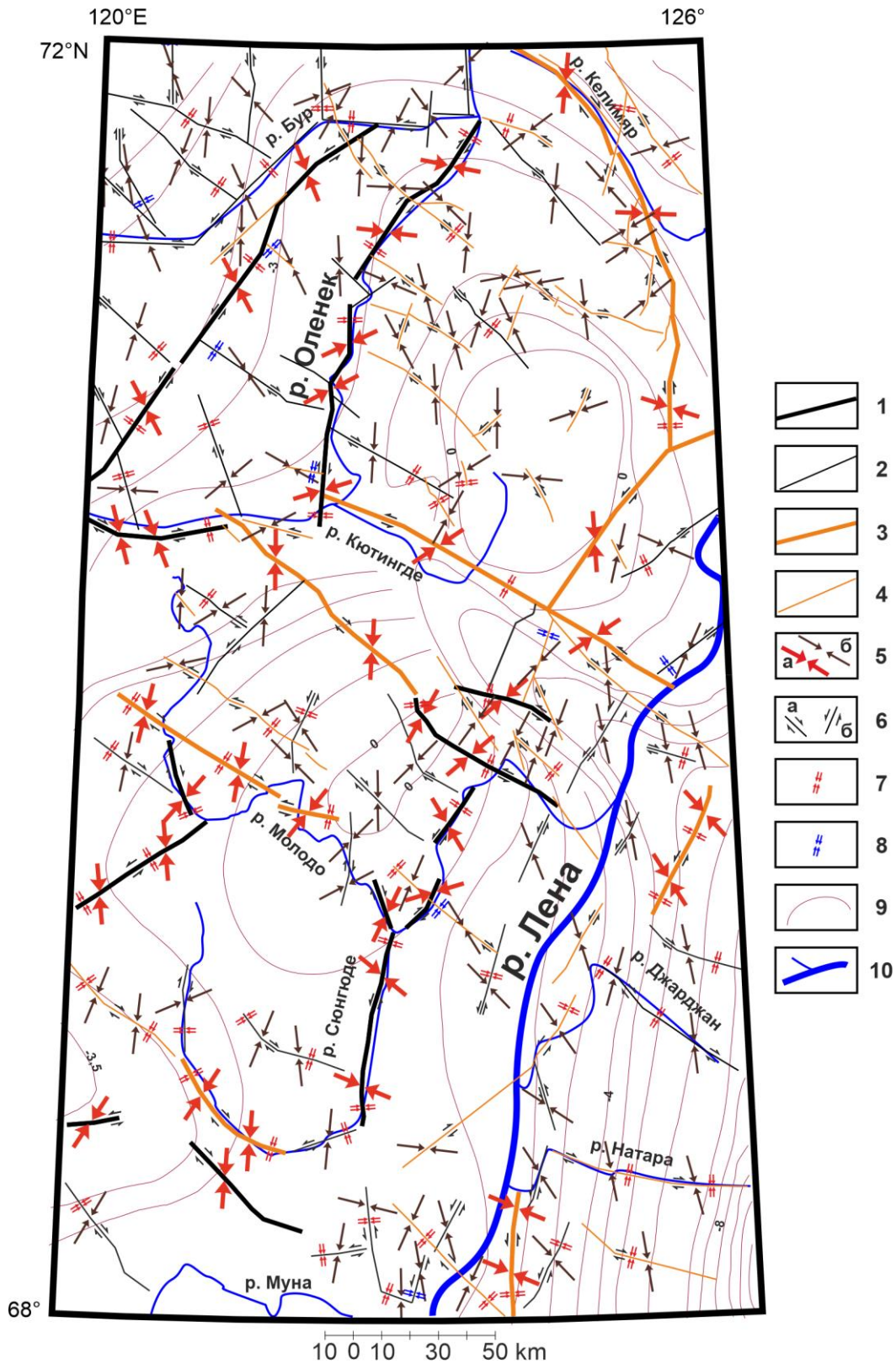


новейшем этапе Оленёкским сводом; над Кютингдинским грабеном развит одноименный прогиб.

Одним из серьезных вопросов реконструкции неотектонических напряжений исследуемого региона является проблема генезиса избыточных напряжений горизонтального сжатия, которая остро стоит перед горняками, в частности, на Кольском полуострове. Эти напряжения также связывают с проявлением дальнедействующего давления от границ литосферных плит. Альтернативой является точка зрения о действии остаточных напряжений предыдущих эпох. Наличие и длительное существование в породах верхних слоев коры остаточных явлений гравитационного напряженного состояния (ГНС) Ю.Л. Ребецкий объясняет протеканием внутренних литосферных процессов, происходящих в коре орогенов, щитов и плит [Ребецкий, 2008]. К ним относятся вертикальные восходящие перемещения, вызванные соответствующими движениями на подошве коры или литосферы. При воздымании поверхности сопутствующие экзогенные процессы приводят к эксгумации пород с больших глубин (2-3 км и более), что вызывает упругую разгрузку вертикальных и лишь частично горизонтальных сжимающих напряжений, обусловленных действием массовых сил. Оставшаяся часть напряжений горизонтального сжатия, гравитационного генезиса, постепенно формирует повышенные напряжения горизонтального сжатия. На основе данных о величине эрозии Фенноскандинавского щита за мезозой–кайнозой [Сим, 2012] стало возможно рассчитать величину избыточных напряжений горизонтального сжатия в массиве горных пород при действии только массовых (гравитационных) сил в породах Кольского полуострова. Расчетная величина сопоставима с величинами современных напряжений, измеренных в Хибинском и Ловозерском массивах [Ребецкий и др., 2017].

В рамках указанного выше явления рост исследуемых поднятий обусловил формирование радиально расходящиеся осей сжатия. Продолжающийся рост Оленёкского поднятия вызвал разделение древнего Оленёк-Анабарского прогиба на Бурскую и Келимярскую впадины, а также смещение оси Кютингдинского новейшего прогиба на юго-запад относительно оси Кютингдинского древнего грабена.

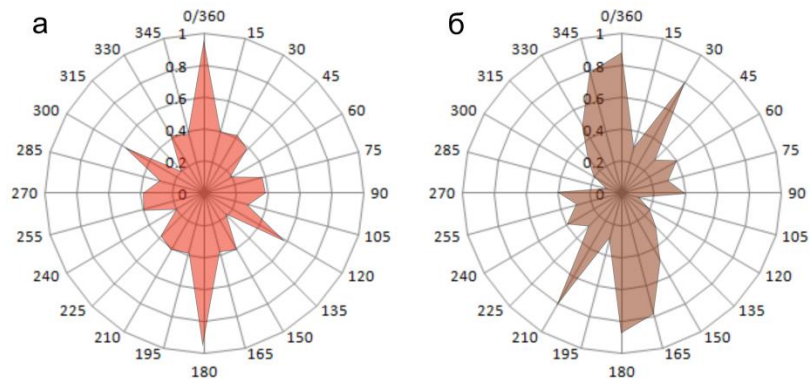
В целом в исследуемой области реконструируется большое количество локальных стресс-состояний (142 определения). По розам-диаграммам (рис. 6) видно, что независимо от ранга реконструируемых напряжений выделяется субмеридиональный максимум сжатия.



**Рис. 5.** Схема новейших напряжений Оленёкского поднятия и его структурного обрамления.

Составили [Гордеев, Суханова, 2017].

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 – изолинии кровли фундамента; 10 – упрощенная гидросеть



**Рис. 6.** Розы-диаграммы по главным осям сжатия на рис. 5: а) первого ранга (39 определений), б) второго ранга (103 определений)

**Выводы по разделу 4.3.** Таким образом, наличие радиально расположенных ориентировок главных осей сжатия вокруг Оленекского поднятия указывает на наличие внутриплитных источников напряжений, никак не связанных с влиянием спрединговых процессов в Арктическом бассейне.

Подтверждена независимость формирования Оленекского поднятия и влияние арктического спрединга (хребет Гаккеля) [Гордеев, 2020] на формирование обрамляющих с северной стороны Оленекского поднятия структур, которые находятся в пределах прибрежной зоны моря Лаптевых.

Эти данные послужили обоснованием 3-го защищаемого положения: **Оленекский и Мунский своды развились из-за внутриплатформенных тектонических напряжений и, в свою очередь, являются источниками напряжений для структур обрамления.**

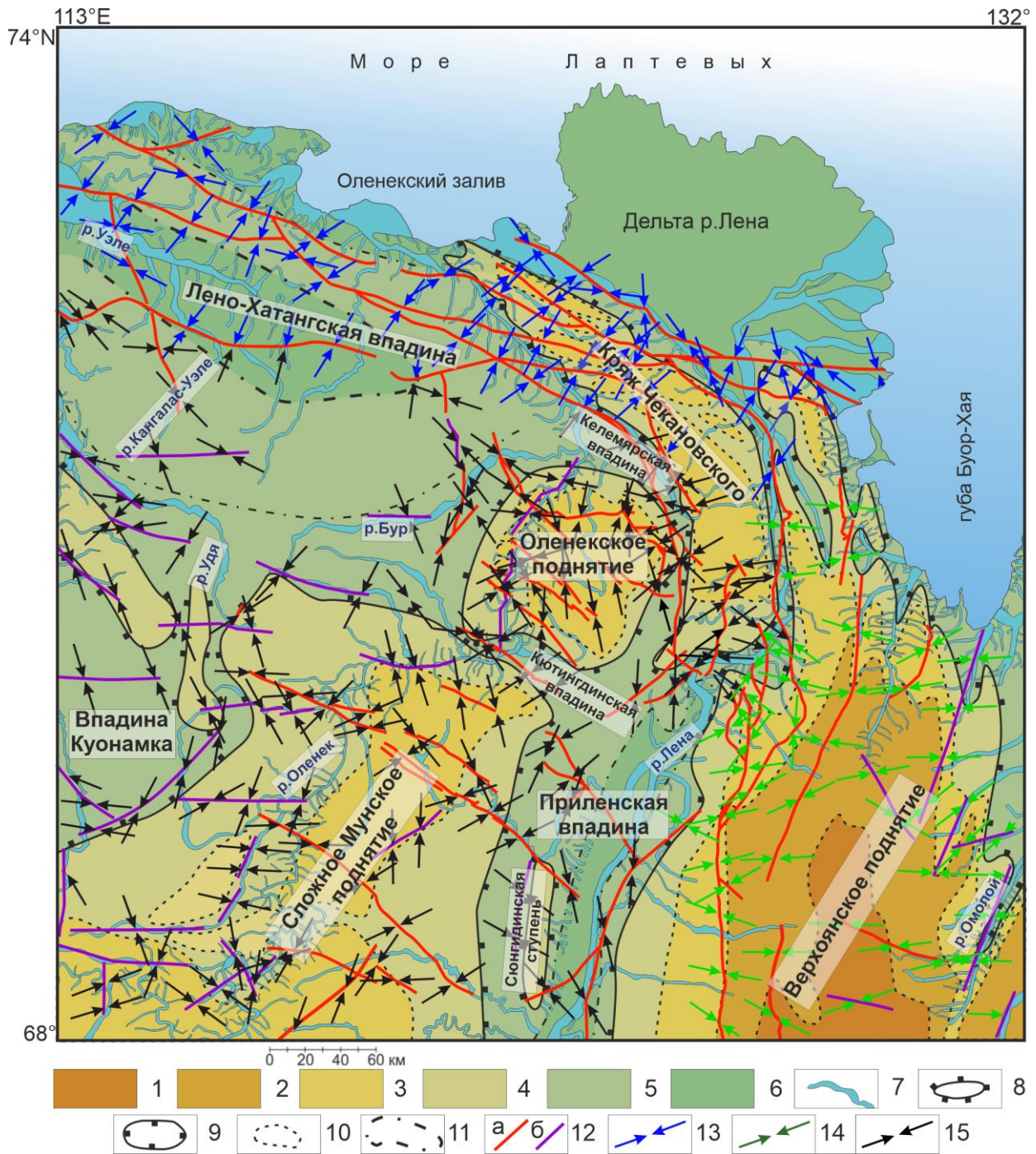
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных геологических исследований изучена история формирования и развития Оленёкского поднятия и структур, которые его обрамляют. При этом использован комплекс различных методов, в том числе, геологических, структурно-геоморфологических, тектонофизических, а также дешифрирование и анализ линеаментов. Это позволило составить схему геодинамики для территории исследования и установить общие закономерности распространения напряжений в областях развития новейших структур (рис. 7).

Установлено следующее: для всего Лаптевоморского побережья свойственно поле напряжения с северо-восточной ориентировкой оси сжатия; северное крыло Лено-Хатангской впадины и кряж Чекановского образуют субширотно вытянутую кулисообразную полосу, в пределах которой развита сопряженная система поднятий и впадин. Это говорит о действующем глобальном источнике напряжений, таком как рассеянный спрединг хребта Гаккеля. Верхоянский хребет испытывает сжатие, ориентированное вкрест простирания. Платформенную область поля напряжения характеризует субмеридиональное сжатие, в котором имеются локальные участки, приуроченные к структурам Оленекского и Мунского поднятий, в их пределах оси сжатия распространяются по радиусу от поднятий, а во впадинах оси сжатия принимают положение вдоль синклинальной оси.

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы.

1. Впервые охарактеризованы неотектоника и неотектонические сдвиговые напряжения северо-востока Сибирской платформы (субмеридиональным сжатием).
2. Установлено влияние орогенеза в Верхоянье на тектонические напряжения северо-востока Сибирской платформы, которое незначительно распространяется на платформу и на восточные борта Мунского и Оленёкского поднятий.
3. Влияние процессов в Арктическом бассейне на неотектоническом этапе не распространяется дальше Лаптевоморского побережья и кряжа Чекановского.
4. На северо-востоке выявлены структуры с внутриплатформенными источниками тектонических напряжений: Оленёкский и Мунский унаследованные неотектонические поднятия с радиальными ориентировками субгоризонтальных осей сжатия.



**Рис. 7.** Схема новейшей геодинамики Лено-Оленокского междуречья и структур его обрамления в масштабе 1:1 000 000. Составили [Гордеев, Сим, 2021].

1-6 – амплитуды новейших движений: 1 – 900-1500 м; 2 – 450-900 м; 3 – 350-450 м; 4 – 250-350 м; 5 – 150-250 м; 6 – 10-150 м; 7 – долины крупных рек; 8-11 – новейшие структуры: 8 – основные поднятия; 9 – впадины; 10 – локальные поднятия; 11 – изогипсы впадин; 12 – дизъюнктивные структуры: а) по геологическим данным [ГГК, R-(50)-52, 1975; ГГК, S-50, S-51, S-52, 2011; ГГК, R-51, 2013; ГГК, R-52, 2015], б) дешифрованные линейменты с восстановленным направлением сдвига и простираем сжатия; 13 – оси сжатия по Лаптевоморской области; 14 – оси сжатия по Верхоянской области; 15 – оси сжатия по объединенной центральной и западной области

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

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; шифр 250000).
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; Scopus; шифр 250000).
3. 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; шифр 250000).

### Публикации, не входящие в список ВАК (все материалы совещаний и т.д.)

1. Сим Л.А., Маринин А.В., Брянцева Г.В., **Гордеев Н.А.**, Бондарь И.В. Особенности неотектонических напряжений Северной Евразии и их взаимосвязь с глобальным тектогенезом // Российская тектонофизика. К 100-летию юбилею М.В. Гзовского. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. 2019. С.125-149.

### Статьи в сборниках:

1. Молчанов А.Б., **Гордеев Н.А.** О применении алгоритмов компьютерного зрения в тектонофизике // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. (в печати)
2. Сим Л.А., **Гордеев Н.А.** О рифтогенезе хребта Гаккеля на Лаптевоморском континентальном склоне // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана. Иркутск, 26–30 апреля 2021 г. / ФГБУН ИЗК СО РАН; ФГБОУ ВО «ИГУ»; отв. ред. К. Ж. Семинский. – Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. – 233 с. <https://doi.org/10.26516/978-5-9624-1919-0.2021.1-233>
3. **Гордеев Н.А.**, Молчанов А. Б. Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции сдвиговых неотектонических напряжений в программе Sim-SGM // Глобальные проблемы Арктики и Антарктики [электронный ресурс]: сборник науч. материалов Всерос. конф. с междунар. участием, посвящен. 90-летию со дня рождения акад. Николая Павловича Лавёрова. Архангельск, 2020. С. 233-226.
4. **Гордеев Н.А.**, Сим Л. А. Арктический спрединг как источник новейшего поля напряжения северо-восточной окраины Сибирской платформы // Материалы IX

Международной научной конференции молодых ученых Молодые - Научкам о Земле. Т. 1 из *Новые идеи в науках о Земле*. Из-во РГГУ им. С. Орджоникидзе. 2020. С. 10-14.

5. **Гордеев Н.А.**, Сим Л.А. Структура новейшего поля напряжений северной окраины Сибирской платформы // Глобальные проблемы Арктики и Антарктики [электронный ресурс]: сборник науч. материалов Всерос. конф. с междунар. участием, посвящен. 90-летию со дня рождения акад. Н.П. Лавёрова. Архангельск, 2020. С. 226-231.
6. Молчанов А.Б., **Гордеев Н.А.** Автоматизация структурно-геоморфологического метода реконструкции неотектонических напряжений Л.А. Сим // Проблемы тектоники континентов и океанов / Материалы LI Тектонического совещания. Т. 2. ГЕОС, Москва, 2019. С. 61-63.
7. Сим Л.А., Ребецкий Ю.Л., **Гордеев Н.А.** Механизм генерации остаточных гравитационных напряжений на щитах древних платформ (на примере Хибинского и Оленекского массивов) // Ма-лы симп. Рифтогенез, орогенез и сопутствующие процессы, Иркутск. 2019. С. 189-191.
8. **Гордеев Н.А.** Взаимосвязь неотектоники и геодинамики древних платформ на примере Оленекского поднятия и его южного обрамления // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН (2018 год). 15. 2018. С. 116-119.
9. Сим Л.А., Маринин А.В., Жиров Д.В., **Гордеев Н.А.** Внутриплатформенные источники тектонических напряжений // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН (2018 год). 15. 2018. С. 331-334. DOI: 10.31241/FNS.2018.15.082
10. Сим Л.А., Маринин А.В., Брянцева Г.В., **Гордеев Н.А.** Особенности напряженно-деформированного состояния горных пород в различных геоструктурных зонах севера Азии // ПРОБЛЕМЫ ТЕКТОНИКИ И ГЕОДИНАМИКИ ЗЕМНОЙ КОРЫ И МАНТИИ. Материалы L Тектонического совещания. Т. 2. ГЕОС, М., 2018. С. 181-184.
11. **Гордеев Н.А.**, Суханова Т.В. Новейшая структура и эволюция развития Оленёкского поднятия (Восточная Сибирь) // Труды всероссийской научной конференции Актуальные проблемы динамической геологии при исследовании платформенных областей. Москва, 24 – 26 мая 2016 г. Перо, 2016. С. 199-203.
12. Суханова Т.В., Макарова Н.В., **Гордеев Н.А.**, Бондарь И.В. Новейшая тектоника Оленек-Келимярского междуречья (северо-восток Сибирской платформы) // Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых поясов и платформ. Материалы XLVIII Тектонического совещания. Т. 2. ГЕОС, Москва, 2016. С. 206-210.
13. **Гордеев Н.А.** Тектонофизический анализ линеаментов Оленекского поднятия // Четвертая тектонофизическая конференция. Т. 1. ИФЗ РАН ИФЗ РАН, 2016. С. 48-52.

Полный список работ автора: ([istina.msu.ru](http://istina.msu.ru)) IstinaResearcherID (IRID): 14922724

Подписано в печать 09.08.2021 г.

Формат 64×84/16. Объем 1,5 усл. печ. л.

Тираж 120 шт. Заказ №

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН

123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1

Тел./факс: (499) 254 90 88.