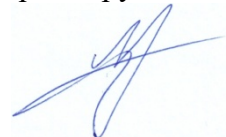


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им.
О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

На правах рукописи



ГОРДЕЕВ НИКИТА АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

Специальность 25.00.03 -
"Геотектоника и геодинамика"
ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник
Лидия Андреевна Сим

Москва – 2021

Содержание

Введение.....	3
ГЛАВА 1. Описание территории исследования: географическое, геологическое.....	8
1.1. Краткий физико-географический очерк.....	8
1.2. Изученность территории исследования	11
1.3. Краткий очерк геологического строения территории Лено-Оленекского междуречья и Лаптевоморского региона.....	16
ГЛАВА 2. Методика исследования	39
2.1. Структурно-геоморфологический метод	39
2.2. 3D геологическое моделирование.....	41
2.3. Линеаментный анализ	42
2.4. Метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим	43
2.5. Программа SimSGM.....	46
ГЛАВА 3. Новейшая тектоника северо-востока Сибирской платформы	65
ГЛАВА 4. Восстановление полей напряжения и геодинамические реконструкции северо-востока Сибирской платформы.....	79
4.1. Общая характеристика напряженного состояния	79
4.2. Влияние спрединга в Арктике на напряженное состояние территории исследования	82
4.3. Внутриплатформенный самостоятельный механизм формирования структур Оленекского и Мунского поднятий.....	92
Заключение.....	100
Литература	102
Приложение.....	115

Введение

Актуальность. Работа посвящена реконструкции тектонических напряжений для характеристики новейшего напряженного состояния и геодинамики северо-восточной части Сибирской платформы. Район исследований включает Оленекское поднятие и его структурное обрамление. На местности он ограничен с запада р. Оленек, с востока р. Леной и Верхоянским хребтом, поэтому далее в работе, для краткости, изучаемую территорию будем называть Лено-Оленекское междуречье (рис. 1.1). Оно расположено в Якутии, в Восточной Сибири, на северо-востоке Сибирской платформы.



Рис. 1.1. Район исследования на космическом снимке [www.google.com/Google Планета Земля].

Этот край 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 (от простейшего описания пород в обнажениях, слагающих территорию исследования, до описания керна глубинных слоев). 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 геологоразведочных и поисковых работ, поисковых работ с применением бурения и исследования скважин, использования методов прикладной геофизики. 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. Результаты неотектонического анализа (т.е. анализа новейших движений структурно-геоморфологическими методами) и реконструкции неотектонических напряжений позволяют делать важные выводы о геодинамических условиях формирования новейших структур, что является первичным шагом для начала детальных работ по территории [Гордеев, Сим, 2019].

Изучению неотектоники на северо-востоке Сибирской платформы посвящены многочисленные труды ученых [Галабала, 1970, 1992; Грачев, 1996; Николаев, 1979; Граханов, 2007-2010, 2010ф; Поляков, 2011; Конторович, 2013; Фролов, 2015; Имаев, 1998, 2000, 2016, 2017], однако неотектонические напряжения остаются изучены слабо [Шерман, 2010; Zoback, 1992]. Это объясняется рядом причин: слабой сейсмичностью большей части региона (исключение составляет Лаптевоморский регион [Грачев, 2003; Имаева, 2016; Имаев, 2017; Engen et al., 2003]), малым количеством GPS станций, труднодоступностью территории для полевых исследований. Обойти вышеперечисленные ограничения и получить данные о неотектоническом структурном плане региона и напряжениях позволяет последовательное применение двух методов: 1. Структурно-геоморфологического метода [Макаров, 1997; Костенко, 1999]; 2. Метода реконструкций сдвиговых неотектонических напряжений [Сим, 1991; Ребецкий, 2017]. Диссертантом разработано программное обеспечение SimSGM [Гордеев, Молчанов, 2018; 2019; 2020; Молчанов, Гордеев, 2019, 2019а, 2020, 2021], которое в значительной степени ускоряет реконструкцию сдвиговых неотектонических напряжений [Сим, 1991, 2000, 2011, 2011а]. В результате исследований впервые установлены новейшие поля напряжений на северо-востоке Сибирской платформы, которые позволили локализовать три крупных структурных плана:

- 1) платформенный (источники напряжений – внутриплатформенные);
- 2) побережье моря Лаптевых (сложнопостроенный участок, зажатый между платформенными напряжениями и напряжениями, связанными с процессами рифтогенеза в Арктике (хребет Гаккеля)) и
- 3) Верхоянский хребет (напряжения, возникающие в процессе интенсивного роста горных цепей Верхоянья в новейший этап).

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.

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 космических снимков и топографических карт масштабов 1:500 000 и 1:1 000 000, материалы Государственной Геологической съемки [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. Задействованы фондовые отчеты и статьи по геологии изучаемого района, тектонике и другим направлениям. Проведена глобальная и детальная реконструкции неотектонический напряжений методом реконструкции сдвиговых неотектонических напряжений Л.А. Сим [Сим, 1991]. Автоматизирован метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений и создан программный пакет, написанный на языке программирования Python [Гордеев, 2019].

Научная новизна. На основе проведенных построений выявлены главные источники новейших напряжений на северо-востоке Сибири. Обнаружена граница распространения наведенных напряжений сжатия от процессов пропагации 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 простираций 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 **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 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.

Личный вклад автора заключается в построении схем новейших тектонических напряжений и схем новейших пликативных и дизъюнктивных структур 1:500 000 и 1:1 000 000 масштабов на основе собранного картографического и литературного материала. Разработка программного обеспечения для структурно-геоморфологического метода Л.А. Сим [1991] и его модернизация. Построение 3D геологических поверхностей. Основные научные результаты отражены в публикациях [Сим, Гордеев, Маринин, 2018], [Сим, Маринин, Брянцева, Гордеев, 2018], [Гордеев, Молчанов, 2019].

Апробация результатов исследований. Результаты проведенных исследований были представлены на Тектоническом совещании XLVIII (2016 г.), L (2018 г.), LI (2019), LII (2020 г.), на Трудах всероссийской научной конференции "Актуальные проблемы динамической геологии при исследовании платформенных областей" (2016 г.), на Четвертой тектонофизической конференции в ИФЗ РАН "Тектоника и актуальные вопросы наук о Земле", на научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН (2017 – 2020 гг.), на XV Ферсмановской научной сессии (ФНС), посвященной 100-летию со дня рождения д.г.-м.н. Е.К. Козлова (2018 г.), на Трудах ФНС ГИ КНЦ РАН (2019 и 2021 гг.), на VIII Российской молодёжной научно-практической школе "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.), (2021 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.). Итого 16 тезисов докладов, 13 статей в сборниках.

Публикации. 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 - системой РИНЦ и SCOPUS.

Объем и структура диссертации. Диссертация общим объемом 118 страниц состоит из трёх глав, введения, заключения, иллюстрирована 41 рисунком, 1 таблицей, 3-мя приложениями. Список литературы включает 137 наименований. 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. 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 геодинимических исследований Лаптевоморского региона в лаборатории геодинимики МГУ им. М.В. Ломоносова. Отдельная благодарность Яковлеву Федору Леонидовичу за внимательное ознакомление и конструктивные замечания по диссертации.

ГЛАВА 1. Описание территории исследования: географическое, геологическое

1.1. Краткий физико-географический очерк

Район исследования расположен на северо-востоке Сибири и ограничен координатами 68°, 74° с.ш. и 113°, 132° в.д. Административно изучаемая территория принадлежит к Булунскому и Оленекскому районам Республики Саха (Якутия, Дальневосточный федеральный округ).

Орография района представлена двумя относительно высокими областями – Северо-Восточной и Средней Сибирью, разделенными низменностью – долиной р. Лены. Среднесибирская область включает в себя элементы плоскогорья и Северо-Сибирской низменности. На исследуемой территории плоскогорья Средней Сибири расположено Оленекское плато, получившее свое название от пересекающей его одноименной реки. Главным образом отметки абсолютных высот Оленекского плато лежат в пределах 250-350 м, однако в некоторых его участках значения превышают 400 м, достигая 450 м у истока р. Молодо и 500 м у истока р. Хорбусуонка. Вдоль долины р. Оленек, приуроченной к плато, глубины расчленения достигают более 200 м (рис. 1.1.1), а притоки реки формируют узкие врезанные каньоны и водопады по зонам трещиноватости.

Северо-Сибирская низменность образована долинами рек Бур и Уэле, где абсолютные отметки высот колеблются от 5 до 150 м, а речная сеть интенсивно меандрирует и имеет множество притоков.

Участок района исследования, относящийся к области Северо-Восточной Сибири, представлен предгорьем Верхоянского хребта и кряжем Чекановского (рис. 1.1.2). Среднесибирское плоскогорье отделяется от Верхоянского хребта долиной р. Лены. На северо-восточном участке в междуречье рр. Лена и Оленек находится кряж Чекановского. Абсолютные высоты кряжа варьируются от 380 м до 440 м, достигая высотной отметки 507 м (водораздел рек Хотугу-Мастах и Согуру-Мастах).

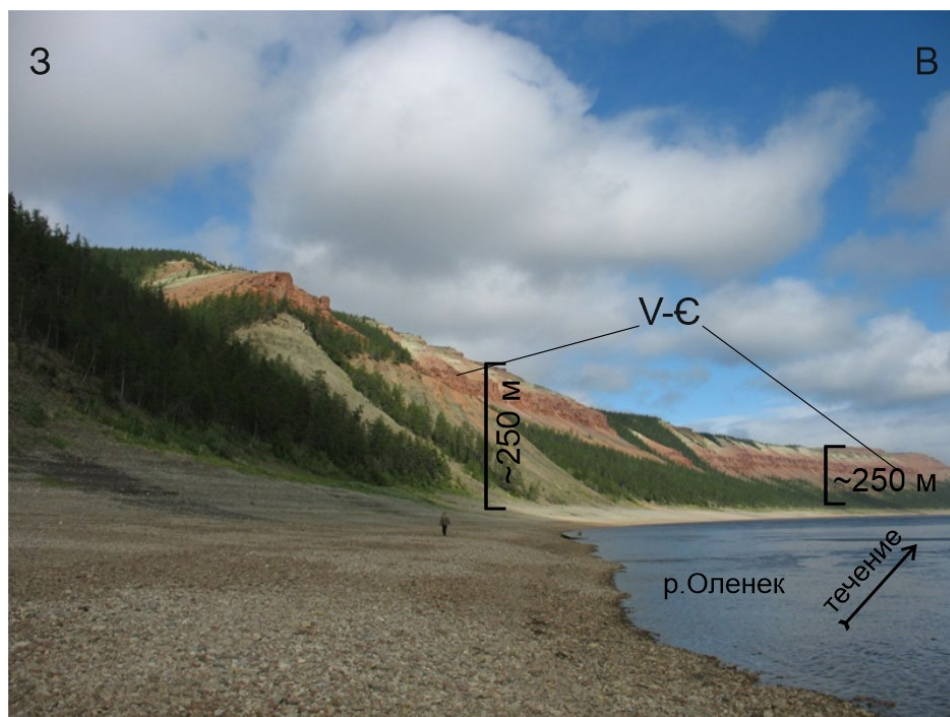


Рис. 1.1.1. Левый берег р. Оленек, в 6 км ниже устья р. Чускуна (фото Б.Б. Кочнева).



Рис. 1.1.2. Кряж Чекановского.

Речная сеть исследуемой территории (рис. 1.1.3) приурочена к водосборным бассейнам рр. Лена и Оленек. В р. Оленек впадают рр. Бур, Келимяр, Кютингде, Беенчиге и Куойка. В р. Лена по левому борту впадают рр. Молодо, Муна, Моторчуна и др., по правому - Джарджан, Натара, Мэнкэрэ и др. Оленек и Лену питают в основном мелководные реки, имеющие в разной степени выработанный продольный профиль. В течение большей части года (с октября по июнь) питающие реки покрыты льдом, а в некоторых случаях промерзают полностью.

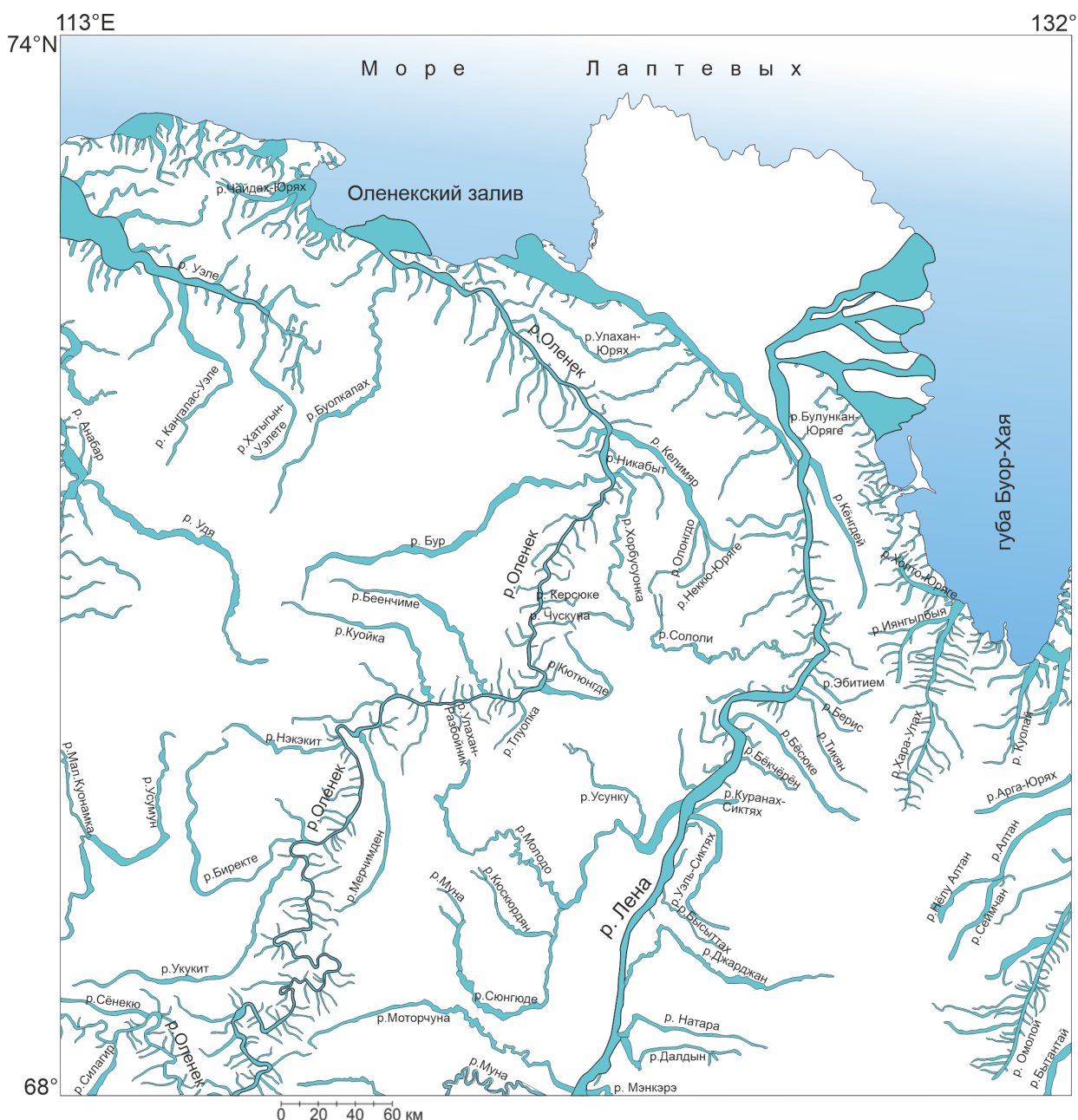


Рис. 1.1.3. Речные долины северо-востока Сибирской платформы и сопряженных территорий. Масштаб 1:1 000 000. Составил Н.А. Гордеев.

Климат территории исследования субарктический, резко континентальный. Распространена многолетняя мерзлота мощностью до 600 м. Под руслами рек Лена, Оленек, Муна имеются талики. Мощность деятельного слоя 0.4-1.5 м (т.е. мощность слоя поверхностного грунта, которая промерзает в зимнее и оттаивает в летнее время года) [Об.зап., R-51, 2013; S-51, S-52, 2014; R-52, 2016].

Рельеф района исследования представляет собой плоскогорье с элементами низменности, образованными речной сетью.

1.2. Изученность территории исследования

В истории геологических исследований района можно выделить четыре этапа.

Первый из них начался во времена первых землепроходцев и завершился работами, связанными с освоением Северного морского пути. До 1939 г. на описываемой территории и прилегающих к ней участках было проведено лишь несколько рекогносцировочных маршрутов, в результате которых были получены самые общие представления о геологическом строении региона [Граханов, 2010ф]. 1939 год можно считать началом систематического изучения геологического строения Лено-Оленекского междуречья. В это время состоялась экспедиция под руководством А.И. Гусева в низовья р. Оленек. Им установлено присутствие кембрийских, нерасчлененных пермских и триасовых, а также юрских и меловых отложений [ГГК РФ, S-51, S-52, 2014].

Полномасштабные геологические исследования данной территории продолжались до 1959 г. В 1957-1958 гг. партия № 247 Амакинской экспедиции под руководством В.В. Алексеева провела мелкообъемное опробование русловых отложений р. Келимяр в районе устья р. Булункан - Юряге. На обоих участках было найдено пять кристаллов алмаза, что стало первым свидетельством промыслового потенциала этой территории.

Второй этап связан с начавшейся в 1950-е годы планомерной геологической съемкой масштаба 1 : 200 000, которая осуществлялась геологами ВАГТ, НИИГА: Р.А. Биджиевым, И.М. Битерманом, Д.А. Вольновым, Р.О. Галабала и др. Эти работы за сравнительно короткий срок были проведены на территории исследования и позволили сформировать представления о геологическом строении и полезных ископаемых территории. Начавшиеся Амакинской экспедицией во второй половине 1950-х годов геолого-поисковые работы продолжались до конца 1960-х. ВАГТ проводились съемки масштабов 1 : 200 000, 1 : 100 000 с целью поисков коренных и россыпных месторождений алмазов [Об. зап., 1960, 1983].

В 1961 г. Б.И. Прокопчуком, сотрудником ВАГТ, установлена алмазоносность руслового аллювия рек Ырас-Юрях и Усунку и найдены первые алмазы в нижнеюрских конгломератах. В этот период была установлена алмазоносность современного аллювия района, выявлены промежуточные коллекторы алмазов четвертичного, неогенового, юрского, пермского возрастов. Поисково-разведочными работами выделено два полигона в бассейне р. Молодо с промышленным и близким к промышленному содержанием алмазов. В Куойкском, Молодинском, Толуопском полях открыто 19 кимберлитовых тел, восемь из которых прорывают породы траптовой формации. Установлена убогая алмазоносность кимберлитовой трубки Хризолитовая, была составлена карта прогноза

Приленского района масштаба 1 : 500 000, разработана методика поисков алмазных месторождений [Кривонос, 1968]. Итогом работ второго этапа служит комплект Госгеолкарты масштаба 1 : 1 000 000 (новая серия), состоящий из четырех карт и объяснительной записки в 2-х частях, подготовленный под редакцией А.А. Межвилка [Межвилк, 1970] и изданный частями в период 1978-1984 гг. [Об. зап., 1983].

На основании проведенных исследований установлены основные этапы развития в новейшее время. Например, этап выравнивания рельефа происходил на протяжении датского века, палеоцена и эоцена [Ким, 1986]. Согласно данным по формированию коры выветривания на платформенной части Сибирской платформы и Верхоянье, планация началась не раньше формирования отложений датского века (60-61.6 млн.лет (палеоцен)) и продолжалась до начала формирования олигоцен-плиоценовых аллювиально-озерных отложений. Активизация неотектонических движений Верхоянья приходится на конец олигоцена-начало миоцена. Свидетельством этому служат мощные песчано-галечниковые олигоцен-плиоценовые осадки, выполняющие предгорные впадины. На платформе активизация началась в конце олигоцена-начале миоцена, так как олигоцен-плиоценовые аллювиально-озерные отложения перекрывают денудационную поверхность выравнивания дат-эоценового возраста. По результатам изучения отложений была построена первая карта новейшей тектоники масштаба 1:1 000 000 [Галабала, 1970], фрагмент которой помещен в раздел диссертации, посвященный изучению неотектоники района.

С 1963 по 1966 гг. Институтом геологии Арктики для изучения геологии и тектоники Лаптевоморского шельфа были проведены комплексные геофизические исследования моря Лаптевых, что позволило уточнить характер пропагации хребта Гаккеля [Полькин, 1970]. В рельефе донной части моря Лаптевых не было обнаружено распространение срединно-океанического хребта, однако по геофизическим полям продолжение оси хребта выделяется и совпадает областью активной сейсмичности [новейш.тект. ..., 2000]. Это, в свою очередь указывает на попытку хребта Гаккеля развиваться в сторону континента.

Начало третьего этапа изучения Северо-Востока Сибири можно связать с изданием Госгеолкарты масштаба 1:1 000 000 (новая серия) в начале 1970-х годов. В течение 1974-1998 гг. в рамках Государственной программы «Север» силами геологов Амакинской экспедиции и ПГО «Аэрогеология» геологической съемкой масштаба 1:50 000 был охвачен бассейн среднего течения р. Оленек (реки Чама, Улахан-Разбойник, Толуопка, Кютюнгде), а также среднего и верхнего течения р. Молодо. В результате ГГС-50 и

АФГК-50 было детализировано геологическое строение отдельных площадей, получены новые данные по стратиграфии, геоморфологии и магматизму [Об.зап., R-51, 1983].

Впоследствии Л.М. Израилев [Израилев, 1986] более детально изучил разновозрастные отложения. Выяснилось последовательное залегание вендских отложений, впервые в пределах района были расчленены отложения нижнего триаса и выделены улаханюрхская, чекановская, станнахская и пастахская свиты.

Р.О. Галабалой на междуречье рек Лена и Оленек были выявлены ранее неизвестные в этом районе стратиграфические подразделения [Галабала, 1988-1992 гг., ф] (Геологическое строение и полезные ископаемые междуречья Лены и Оленька). Было уточнено расчленение морских отложений мела, которые раньше входили в состав хаиргасской и кигиляхской свит, по литологическим признакам они были отнесены к лепперенгской свите волжского яруса, а остальные были объединены под названием корнильевской свиты с разделением ее на три подсвиты. Детальное картирование разновозрастных отложений, анализ их фаций, а также изучение геофизических полей позволили значительно уточнить структуру района и отдельных его участков.

Кроме этого в 1983 году Арчевым и др. [Об.зап., R-52, 2016] описаны тектонические структуры Верхоянья и их геодинамика. Среди прочих, детально описано Атырканское поднятие, которое входит в исследуемый участок и испытало сильную активизацию в новейшее время (миоцен). Амплитуды смещения в его пределах насчитывают ~120-150 м.

Р.О. Галабала в 1985 г. провёл исследование, связывающее нефтегазоносные бассейны северо-востока Сибирской платформы с неотектоникой [Галабала, 1985]. Автор отметил, что при попытке локализовать нефтегазоносные области необходимо помимо учета и реконструкции суммарных амплитуд движения учитывать их колебания, динамику неотектонических движений во времени. Например, для Оленекского и Мунского поднятий характерны суммарные подвижки от 200-400 м до 500 м, что теоретически должно было привести к улучшению коллекторских свойств битуминозных горизонтов верхнего протерозоя и венда в связи с ростом трещиноватости. Однако этого не произошло, так как подвижки по крупным разрывам разрушили нефтегазовые толщи [Галабала, 1985].

Б.И. Ким рассмотрел историю развития Лаптевоморского шельфа в кайнозое. Так, в период с конца позднего мела (даний) по ранний палеоцен включительно Лаптевоморский шельф испытал режим пенепленизации, а в среднем-позднем палеоцене настал этап резкой тектонической активизации, характеризующийся денудационно-аккумулятивной равниной для шельфа. С раннего эоцена по ранний олигоцен район шельфа моря

Лаптевых испытывал трансгрессивный этап. Сформировались озерно-аллювиальные и прибрежно-морские отложения [Ким, 1985, 1986]. К началу второй половины плейстоцена трансгрессия достигла современной береговой линии и продолжается по настоящее время.

В 1990-е велись геофизические работы, нацеленные на изучение рассеянного спрединга в Арктике [Fujita et al., 1990; Franke et al., 1998]. В совокупности по геоморфологии дна и сейсмическим событиям удастся установить, что разрывы почти не проявляются в плиоцен-четвертичных осадках, однако сейсмичность имеет концентрированные очаги близ Ляховских островов, в дельте р. Лена, в районе губы Буор-Хая и на северном склоне кряжа Чекановского, в Оленекском заливе.

Четвертым этапом можно считать период с начала 2000-х по настоящее время.

В 2000-м году опубликована работа С.С. Драчева [Драчев, 2000], где автор детально рассматривает историю развития Лаптевоморского шельфа. По его результатам кайнозойская история раскрытия Арктики имеет 4 основных этапа: 1. Раскол континента в конце палеоцена-эоцене. 2. Вместе с пропагацией рифта происходит смещение полюса вращения на юго-восток (олигоцен-средний миоцен). 3. Рифтогенез в северной области моря Лаптевых приходится на конец среднего миоцена – среднего плейстоцена. 4. Со среднего плиоцена по настоящее время – редуцирование рифтогенеза со смещением полюса вращения в область губы Буор-Хая.

В 2011 г. опубликована работа Полякова [Поляков, 2011], описывающая полученные им новые данные о геологическом строении Оленекского месторождения битумов (пермь). Авторы рассматривают северо-восток Восточной Сибири, как территорию, приоритетную для геологического изучения, направленного на поиски крупных месторождений нефти. В период с 2011 по 2016 гг. учеными (ВСЕГЕИ) опубликованы материалы, которые были получены разномасштабной геологической съемкой с привлечением методов геофизики, аэрогеологии и др. На основании этого были сделаны обобщенные и подробные материалы по геологии [ГГК, S-50, S-51, S-52, 2011; ГГК, R-51, 2013; ГГК, R-52, 2016].

В 1998 и 2016 гг. опубликованы материалы по сейсмотектонике Лаптевоморского участка, где рассматривается геодинамическое влияние Хребта Гаккеля на тектонические структуры северо-востока Сибирской платформы и Лаптевоморского региона [Имаев, 1998, Имаева, 2016]. Данный район авторы рассматривают как уникальный регион, в котором в тектонофизическом плане происходит изменение региональной обстановки растяжения на сжатие и наблюдается прямая взаимосвязь континентальных структур Сибирской платформы с океаническими. В данном случае это Хребет Гаккеля.

В 2016 Л.И. Лобковский исследует вопросы тектоники деформируемых плит. Помимо прочего в данной работе обсуждается история раскрытия Арктического бассейна и эволюции хребта Гаккеля. Во многом результаты автора совпадают с выводами С.С. Драчева [2000] с той разницей, что вместо стадии редуцирования рифтогенеза предлагается вариант рассеянного или диффузного спрединга [Лобковский, 2016]. Т.е. границы плит в привычном её понимании не существует, однако она имеет геоморфологический, сейсмический след по типу зоны Черского [Имаева, 2017]. Также предложен еще один вариант развития Арктического бассейна [Дубинин, 2021; Агранов, 2021], в котором предполагается, что хребет Гаккеля посредством трансформных разломов постепенно мигрирует на восток по причине отсутствия горячей точки в шельфе моря Лаптевых.

Напряжения на исследуемой территории изучены слабо, так как сейсмичность развита только на Лаптевоморском шельфе, а на суше нет приемников GPS. Среднесибирское плоскогорье и низменность являются труднодоступной территорией по причине отсутствия транспортного сообщения. Немногочисленные работы по изучению напряжений опубликованы в работах ученых ИЗК СО РАН В.С. и Л.П. Имаевых [Имаева, 2015] и С.И. Шермана [2010]. Среднесибирское плоскогорье является белым пятном на картах напряженного состояния упругой части литосферы.

Таким образом, длительное изучение Лено-Оленекского междуречья показывает, что данный район можно отнести к числу уникальных по геологическому строению территорий. Детальное изучение новейших напряжений и тектоники района может стать одним из перспективных направлений для дальнейших исследований, необходимых для решения вопросов поиска полезных ископаемых и инженерной геологии. Результатом таких исследований являются современные схемы геодинамики, полей напряжения, схемы развития рельефа, его стабильных и нестабильных участков. Изученность Лено-Оленекского междуречья в целом можно считать хорошей.

1.3. Краткий очерк геологического строения территории Лено-Оленекского междуречья и Лаптевоморского региона

В геологическом строении Лено-Оленекского междуречья принимают участие отложения нескольких структурных этажей, различающихся характером распространения, мощностью, вещественным составом и другими признаками (рис. 1.3.1). 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. Мощность чехла изменяется от первых метров на склоне Сололийского поднятия до 6 км в Лено-Анабарском и Предверхоянском прогибах, а на большей части территории она составляет порядка 3 км [Гордеев, Сим, 2019а].

Характеристика стратиграфических образований

Геологическое строение описано по материалам геологических съемок [Об. зап., 1960; ГК СССР, 1960; ГГК, об. зап., R-(50)-52, 1983; ГГК, об. зап., S-50, S-51, S-52, 2011; ГГК, об. зап., R-51, 2013; ГГК, об. зап., R-52, 2016].

Протерозойская акротема (PR)

К этому подразделению относятся как нижне-, так и верхнепротерозойские образования.

Нижнепротерозойская зонотема (PR₁)

Образования данного возрастного диапазона выходят на дневную поверхность на двух участках: наиболее широко в центральной части Оленекского свода. Они представлены метаморфизованными и смятыми в складки породами. Слагают терригенные, реже вулканогенные образования – сланцы, филлиты, метапесчаники, метаалевролиты, кварциты, метавулканиты, метариодациты, метатрахидациты, маломощные прослои туфов, туффитов. Эти образования повсеместно со структурным несогласием перекрыты рифейско-фанерозойскими отложениями платформенного чехла; нижняя граница их не вскрыта. В этот временной интервал происходило завершение амальгамации континентов, сопровождаемое вспылками субщелочного магматизма, пассивной и активной (Верхоянье) континентальных окраин.

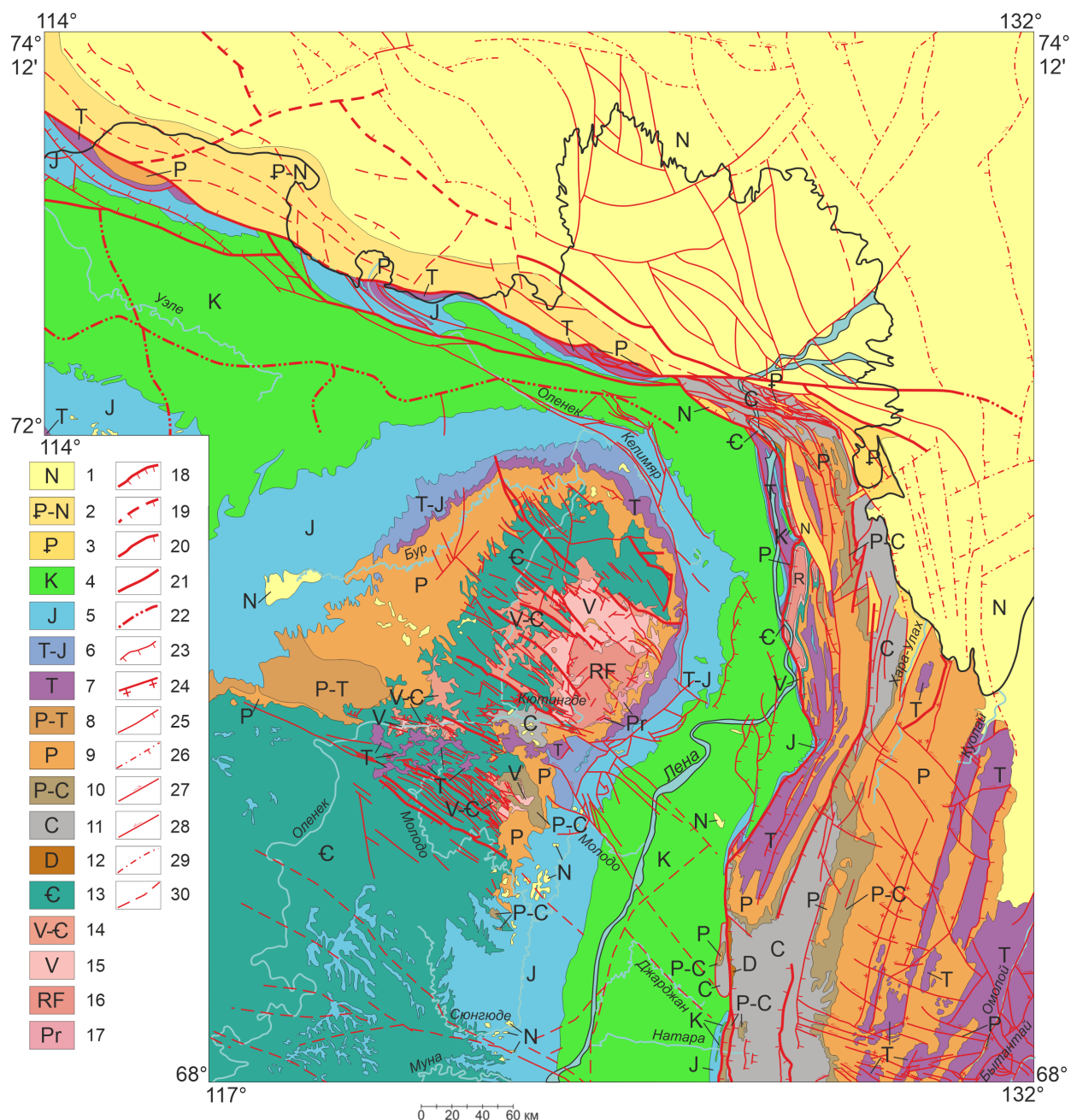


Рис. 1.3.1. Геологическая карта, [по материалам ГТК, R-(50)-52, 1983; ГТК, Q-52, 2008; ГТК, S-50, S-51, S-52, 2011; ГТК, R-51, 2013; ГТК, R-52, 2016], с упрощениями И.В. Бондарь, Н.А. Гордеев.

1 – Неогеновая система. Неоген. Толща брекчий со щебнем и глыбами доломитов, известняков, алевролитов, песчаников, галечники, ожелезненные пески, конгломераты (от 15-600 м); 2 – Палеоген-неоген. Пески, базальные галечники, прослой гравийников и глин (50-1200 м); 3 – Палеогеновая система. Палеоген. Глины, аргиллиты с пластами бурых углей, прослой песчаников, линзы галечников (300-1200 м); 4 – Меловая система. Алевролиты, песчаники, аргиллиты с линзами гравелитов и конгломератов, доломиты, в разных частях разреза присутствуют угленосные толщи (до 1200 м); 5 – Юрская система. Пески, песчаники, алевролиты, аргиллиты (битуминозные), известняки, глины, включения

известково-глинистых конкреций, местами зерна глауконита в аргиллитах (до 700 м; до 2500 м для Верхоянья); 6 – Триас-юра. Конгломераты, песчаники, алевролиты с прослоями глин и аргиллитов, маломощные линзы углей и углефицированного детрита (132-215 м); 7 – Триасовая система. Песчаники, аргиллиты, алевролиты, известняки, туфы, туфоалевролиты, туфогравеллиты, туфоконгломераты (до 550 м; 4000-6500 м для Верхоянья); 8 – Пермь-триас. Туфы, туффиты (нерасчлененные, до 200 м); 9 – Пермская система. Серые песчаники средне- и мелкозернистые с прослоями плотных песчаников мелко-среднезернистых, линзы и прослои алевролитов и углистых сланцев, метаморфизованные сланцы, магматические породы среднего состава, битуминозные сланцы и известняки (до 985 м); 10 – Пермь-карбон. Переслаивание: алевролиты, песчаники, аргиллиты прослои песчаников (до 1600 м); 11 – Каменноугольная система. Мергели, известняки, доломиты, конгломераты и песчаники, алевролиты и гипсы и гравелиты (до 240 м; до 4300 м для Верхоянья); 12 – Девонская система. Песчаники, алевролиты, известняки, ангидриты, гипсы, линзы известняков, пестроцветные известковистые сланцы и известковистые песчаники, линзы конгломератов (до 1700 м); 13 – Кембрийская система. Известняки, реже мергели, нередко глинистые мергели, темно-серые сланцы, доломиты (до 1824 м); 14 – Венд-кембрий. Песчаники, алевролиты, аргиллиты, гравелиты, конгломераты, известняки, туфоконгломераты, туфобрекчии (до 470 м); 15 – Вендская система. Песчаники, доломиты и известняки (до 400 м); 16 – Рифей. Песчаники кварцевые, полевошпат-кварцевые зеленовато-серые с линзовидными прослоями кварцито-песчаники глауконитовых, гравелитов, конгломератов, алевролитов; в основании залегают валунно-галечные кварцевые конгломераты, гравелиты, песчаники (до 1680 м); 17 – Протерозой нижний. Сланцы, филлиты, метапесчаники, метаалевролиты, кварциты, метавулканиты, метариодациты, метатрахиды, маломощные прослои туфов, туффитов (до 2600 м); 18-30 – Дизъюнктивные структуры: 18 – Надвиги достоверные; 19 – Надвиги погребенные; 20 – Сбросы достоверные; 21 – неясной кинематики; 22 – Неясной кинематики предполагаемые; 23 – Надвиги второстепенные, достоверные; 24 – Взбросы второстепенные, достоверные; 25 – Сбросы второстепенные; 26 – Сбросы второстепенные, погребенные; 27 – Правый сдвиг; 28 – Левый сдвиг; 29 – Неясной кинематики второстепенные, достоверные; 30 – Неясной кинематики второстепенные, погребенные.

Верхнепротерозойская зонотема (PR₂)

Верхний протерозой включает рифейские и вендские отложения.

Рифейская эонотема (RF)

Рифейские образования наиболее полно развиты в северной части рассматриваемой территории, где наблюдаются обнажения на Сололийском поднятии (Оленекский свод). Южнее (Молодо-Оленекское междуречье) объем рифейских отложений значительно сокращается (Салабынский выступ Куойкско-Далдынского поднятия), а на большей части восточных и юго-восточных районов территории (бассейн р. Лена) они, по всей вероятности, отсутствуют.

По своему происхождению и составу рифейские толщи – это мелководные терригенные и терригенно-карбонатные образования (кварцевые песчаники, полевошпат-кварцевые зеленовато-серые с линзовидными прослоями кварцито-песчаники, гравелиты, конгломераты, алевролиты; в основании залегают валунно-галечные кварцевые конгломераты, гравелиты, песчаники [Об. зап., R-51, 2013]). С них начинаются образования платформенного чехла, они залегают с размывом и резким угловым несогласием на сложно дислоцированных метаморфизованных образованиях нижнего протерозоя.

В рифее территория представляла собой преимущественно терригенно-карбонатную платформу, которая переходила в пассивную континентальную окраину к северу, и востоку.

Вендская система (V)

Отложения венда обнажаются преимущественно в пределах Оленекского свода, а также вскрыты на севере и на юге изучаемой территории Бурской и Мунской скважинами соответственно. На востоке образования этого возраста отсутствуют. Вендские отложения, залегающие с угловым несогласием на разных горизонтах рифея, представлены терригенными, терригенно-карбонатными и карбонатными породами. Это, главным образом, песчаники, доломиты и известняки различной мощности, которые накопились в мелководно-прибрежных и лагунных условиях.

Вендская система – кембрийская система (V-Є)

Венд-кембрийские образования приурочены к тем же районам, что и вендские отложения. Развиты в пределах Оленекского поднятия и представлены слоистым разрезом снизу вверх: песчаники, алевролиты, аргиллиты, известняки, часто глинистые алевролитистые, песчанистые, песчаники разномзернистые. На территории господствовали обстановки накопления терригенно-карбонатных отложений. Условия мелководного морского бассейна и аридный климат в пределах карбонатной платформы.

Палеозойская эратема (PZ)

Палеозойские образования на рассматриваемой территории представлены

кембрийскими, каменноугольными и пермскими отложениями.

Кембрийская система (Є)

Кембрийская система включает три отдела. Отложения кембрия залегают с угловым и стратиграфическим несогласием на отложениях рифея (до 1500-2000 м). Они развиты наиболее широко, по сравнению с другими отложениями, занимая почти всю западную половину территории. Выходы кембрийских отложений установлены на Оленекском своде, к западу от Сололийского поднятия, к югу от Оленекского поднятия в Кютюнгдинском грабене. Представлены кембрийские отложения, в основном, известняками, реже мергелями (частично глинистыми), а также темно-серыми сланцами, доломитами.

Территория в данный интервал времени представляла собой глубоководную карбонатную платформу.

Девонская система (D)

Отложения распространены в Верхоянской области. Развиты отложения разнообразного генезиса, которые встречаются преимущественно вдоль тектонических блоков. Песчаники, алевролиты, известняки, ангидриты, гипсы, линзы известняков, пестроцветные известковистые сланцы и известковистые песчаники, линзы конгломератов мощностью до 1700 м.

В девонский период происходило формирование систем континентальных рифтов, заложился такой рифт, как Кютингдинский грабен.

Каменноугольная система (C)

Каменноугольные отложения на территории исследования с размывом залегают на разных горизонтах венда или кембрия. Сложены мергелями, известняками, доломитами, конгломератами и песчаниками, алевролитами и гипсами и гравелитами. Распространены только в пределах Кютюнгдинского грабена, где сформированы лагунно-континентальными карбонатно-терригенными грубообломочными породами, лагунно-морскими карбонатными и глинисто-карбонатными гипсоносными образованиями и прибрежно-морскими карбонатными отложениями (до 150-200 м) [Мигурский, 2018].

Отложения накапливались в условиях континентального сноса и предгорной впадины (сноса со стороны Врехоянья).

Каменноугольная система – пермская система (C-P)

Отложения распространены в Верхоянской области. Они представлены переслаивающимися алевролитами, песчаниками, аргиллитами с прослоями песчаников. Мощность отложений достигает свыше 1500 м.

Пермская система (Р)

На территории листа пермские отложения обрамляют с востока и запада Оленекский свод. Залегают с небольшим угловым несогласием на отложениях карбона (до 500 м). Они включают образования всех трех отделов. Обнажаются в береговых обрывах рек (Оленек, Келимяр, Хорбусуонка).

Территория сложена серыми песчаниками средне- и мелкозернистыми с прослоями плотных песчаников мелко-среднезернистых и крупными (до 6 м в диаметре) конкрециями песчаников, линзами и линзовидными прослоями алевролитов и углистых сланцев. По всему разрезу встречаются кварц, кремни желваковые, метаморфизованные сланцы, яшмоиды, окремненные известняки, магматические породы среднего состава, битуминозные сланцы и оолитовые известняки [Об. зап., Q-52, 2008].

Равнинный рельеф представлен пенеппеном, окруженным мелководьем и лагунами. Отложения накапливались за счет ближнего денудационного сноса с осушенной части.

Пермская система – триасовая система (Р-Т)

Нерасчлененные отложения, развитые на западе Северо-Сибирского плоскогорья. Представлены нерасчлененными туфами и туффитами. Общая мощность до 200 м.

На рубеже перми-триаса происходило общее поднятие территории с проявлениями вулканизма.

Мезозойская эратема (МЗ)

Включает образования триаса, юры и мела.

Триасовая система (Т)

Триасовые отложения на территории исследования залегают несогласно с отложениями перми. Они представлены, в основном, своим нижним отделом, образующим два территориально разобщенных типа разреза – терригенный и вулканогенный. Отложения триаса вскрываются в зоне сочленения южного борта Лено-Анабарского и западного борта Приверхоянского прогибов с Сололийским поднятием Оленекского свода, представлены песчаниками, аргиллитами, алевролитами, известняками (до 150-280 м). Вулканогенные образования, туфы, туфоалевролиты, туфогравеллиты, туфоконгломераты (до 270 м) закартированы в центральной части территории, охватывая районы Куойкско-Далдынского поднятия и Кютингдинского грабена.

В это время территория испытала очередное общее поднятие. Отложения накапливались в виде субаэральных излияний базальтов в областях растяжения

(Кютингиднский грабен) и в прибрежно-морских условиях севера и востока (этап трангрессии).

Триасовая система – юрская система (Т-Ј)

Триасово-юрские отложения формируют мощный дугообразный комплекс отложений, облекающий Оленекский свод, и входит в состав Лено-Анабарского и Приверхоянского прогибов. Представлены конгломератами, песчаниками, алевролитами с прослоями глин и аргиллитов, глинами, аргиллитами, алевролитами с редкими и маломощными прослоями песчаников. Присутствуют маломощные линзы углей и углифицированного детрита. Общая мощность отложений Т-Ј возраста, облекающих Оленекский свод достигает 135-215 м.

Юрская система (Ј)

На территории изучения отложения юрской системы представлены самыми различными типами. Отложения формируют сложный разнофациальный комплекс, образованный в северной части территории морскими отложениями. Они постепенно сменяются на лагунные и континентальные, трансгрессивно залегающие на подстилающих отложениях триаса. Это пески, песчаники, алевролиты, аргиллиты (битуминозные), известняки, глины, включения известково-глинистых конкреций, местами зерна глауконита в аргиллитах. Обнажаются во всех крупных структурах – на Оленекском и Сололийском поднятиях, Кютюнгиднском грабене, западном борте Приверхоянского прогиба. Сложены известняками, глинами, песчаниками, аргиллитами (до 700 м).

Несмотря на трансгрессивный этап, отложения накапливались только по периферии с востока и севера.

Меловая система (К)

В пределах рассматриваемой территории породы меловой системы представлены нижним отделом. Они распространены только на востоке изучаемой территории, заполняя Лено-Анабарский и Приверхоянский прогибы. Согласно или с перерывом перекрывают подстилающие отложения юры, имеют преимущественно континентальный генезис, и сложены алевролитами, песчаниками, аргиллитами с линзами гравелитов и конгломератов, доломитами (до 1200 м). В разных частях разреза присутствуют угленосные толщи. На юго-востоке Лено-Анабарского и на севере и северо-западе Приверхоянского прогибов континентальные отложения замещаются морскими фациями, являющимися отражением позднеюрско-раннемеловой Арктической трансгрессии. Эти особенности седиментогенеза позволяют установить в рассматриваемом

стратиграфическом интервале переходную - от морских к континентальным (берриас-валанжин)- и континентальную (берриас-альб) «области» седиментогенеза.

В течение мелового периода сменялись эпохи незначительных трансгрессий и регрессий, шел интенсивный континентальный снос в прогибы с запада на восток, и с развивающегося Верхоянского хребта с юга на север.

На территории исследования самые крупные перерывы осадконакопления приурочены ко времени всего ордовика (О), силура (S) и девона (D), за исключением предгорий Верхоянья (здесь распространяются отложения (D)).

Кайнозойская эратема (KZ)

Это подразделение представлено неогеновой и четвертичной системами. Палеоген проходит в условиях пенеппенизации.

Палеогеновая система – неогеновая система (P-N)

Палеоген-неоген. Нерасчлененные отложения (P-N). Палеоген-неогеновые отложения на территории исследования развиты в прибрежной и шельфовой части моря Лаптевых. Развиты континентальные, озерные, озерно-болотные и аллювиальные, лагунные отложения. Они представлены песчаниками, глинами, углисто-глинистыми сланцами, мергелями (с пластами и линзами угля мощностью до 2,4 м), конгломератами, песками, глинами и лигнитами.

Общая мощность палеоген-неогеновых отложений достигает более 800 м. Территория исследования на начало палеогена (палеоцен) представляла собой слаборасчлененное плато, полого-погружающееся в северном направлении. В эоцене отмечаются тектонические движения. Установлены следы морских трансгрессий в отложениях северного Верхоянья и Новосибирских островов [Об.зап., S-51-52, 2014].

Неогеновая система (N)

В изучаемом районе неоген включает оба отдела – миоцен и плиоцен. В разрезах неогеновых отложений выделяются преимущественно аллювиальные образования, слагающие террасовые уровни реликтовой гидросети (конец олигоцена) на междуречье Лена-Оленек. В это время, очевидно, господствовал континентальный режим осадконакопления.

Миоцен (N₁)

Данные о распространении этого отдела получены из обнажения по склону долины р. Мэнкэрэ, на местах, где склоновыми процессами был разрушен моренный покров. Толщу образуют пески, базальные галечники, прослои гравийников и глин, мощность – более 50 м. Залегает толща с несогласием на породах раннемелового возраста, с

перекрытием верхне-неоплейстоценовыми ледниковыми образованиями. Отложения миоцена развиты повсеместно в долинах рек, местами на водоразделах.

Плиоцен (N₂)

Естественные выходы плиоцена на территории развиты на северо-восточном обрамлении Оленекского поднятия, вдоль Келимярской впадины, на водоразделах Никабыт-Келимяр, Хорбусуонка-Никабыт, Хорбусуонка-Оленек, в бассейнах рек Буор-Экит и Кютюнгде. Представлены водораздельными галечниками и аллювием Палео-Лены.

Плиоценовые отложения развиты на средних абсолютных отметках (180-200 м) в междуречьях Келимяр – Никабыт и Никабыт – Хорбусуонка к северо-западу и западу от исследуемого района. Они представлены преимущественно галечниками. Более детальное изучение плиоценовых отложений показало чётко выраженное двучленное строение: в нижней части (5-8 см) прослой пластичных глин с примесью супеси и с обилием растительных остатков, в верхней (15-25 см) – гравийно-галечные образования с железистым цементом. Галечники залегают на размытой поверхности тонколистоватых алевролитов, содержащих линзовидные прослои песчаников бурого цвета и большое количество фрагментов окаменелой древесины (древесина плотная, уплощённой формы, пиритизированная). Датированы палинологическим методом, как первая половина плиоцена. Общая мощность не превосходит 50 см. Возраст этих отложений в некоторых работах [Об. записка, 1960] определяется как начало среднего плейстоцена или ранний плейстоцен. Вероятно, это аллювиальные образования палео-Лены, которая до и во время максимального оледенения протекала по системе рек Экит – Келимяр вдоль р. Оленек [Пуминов, 1960]. В конце межледниковой эпохи и в начале зырянского оледенения (поздний плейстоцен) р. Лена утратила связь с долиной р. Оленек и, отходя к востоку, заняла область своей современной долины.

Толща водораздельных галечников представлена ожелезненными галечниками и песками с гальками и валунами. Мощность - до 15 м. Залегают толща на размытой поверхности палеозоя и мезозоя на абс. выс. 170-200 м, понижающихся к северу до 45 м. Полоса, в которой на водоразделах встречены останцы древних галечников, протягивается в субмеридиональном направлении от нижнего течения р. Муна до низовьев р. Оленек, через долины рек Моторчуна, Сюнгюде, Молодо, Кютюнгде.

Разрезы водораздельных галечников на разных участках неодинаковы. В одних случаях они состоят из чередующихся галечниковых и песчаных прослоев, в других отложения представлены исключительно галечниками или только песками с галькой. Отмечено понижение уровней подошвы галечников с юга на север и с запада на восток.

Четвертичная система (Q)

Рыхлые четвертичные отложения на территории исследования развиты повсеместно. Отложения представлены разнообразными генетическими типами и фациальными 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.

Мощность четвертичных отложений меняется достаточно сильно в разных местах: на водоразделах она составляет 2-6 м, в понижениях дочетвертичного рельефа достигает 110 м. На платформенной равнине Сибирской платформы в разрезе принимают участие разновозрастные аллювиальные отложения, образующие террасоувалы и лестницы террас. На водоразделах наблюдаются элювий и нерасчлененные элювий и делювий, а склоны долин покрыты коллювием и нерасчлененными делювиально-солифлюкционными отложениями. Покровные полигенетические образования развиты в долинах и на водоразделах.

В Приленской впадине и в долине Лены, главным образом, выделяются аллювиальные отложения, переслаивающиеся с образованиями ледниковых комплексов. По геологическим данным оледенения охватывали около 20 % территории исследования в его юго-восточной части. Центром оледенений была Верхоянская горная система, откуда ледники распространялись, занимая Приверхоянскую предгорную равнину.

Эоплейстоцен (Q_E)

Эоплейстоцен представлен нижним и верхним звеньями. В генетическом отношении это аллювий высоких цокольных (черендейская и тустаахская) террас притоков р. Лена.

Нижнее звено (Q_{E1})

В составе нижнего звена на территории исследования выделена черендейская свита, слагающая аккумулятивные отложения аллювиальных высоких цокольных террас. Террасы расположены на абсолютных отметках от 100-180 м. Свита распространена во всех районах. Аллювий – это галечники, гравийники, пески разнородные диагонально и косослоистые, иногда с гальками, отложения интенсивно ожелезнены. Мощность - до 20 м. Залегает на коренных и перекрывает плиоценовые отложения. Свита развита в пониженных участках долин рек Хорбусуонка, Кютингде, Молодо, Сюнгюде, Моторчуна.

Верхнее звено (Q_{E2})

Верхнее звено представлено тустахской свитой, сложенной аккумулятивными отложениями аллювиальных цокольных террас, их абсолютная высота террас на гипсометрических отметках от 60-150 м. Свита обнаружена во всех районах, в бассейнах рек Молодо, Сюнгюде, Моторчуна, Муна. Залегают на средне-палеозойских или перекрывает плиоценовые отложения.

Неоплейстоцен (Q_N)

Неоплейстоцен представлен нижним, средним и верхним звеньями. Выделено четыре генетических типа отложений: ледниковые, аллювиальные, прибрежно-морские и лёссы. Развита на водоразделах левобережья р. Келимяр, в пределах долин палео-Лены, а также в долинах наиболее крупных современных рек.

Отложения нижнего и среднего звеньев представлены аллювием р. Палео-Лены, протекавшей в то время вдоль кряжа Чекановского в направлении долины р. Оленек [Геол. карта..., 1960] эти отложения датируются средним неоплейстоценом. На карте Граханова [Граханов, 2010ф], возможно, такие же отложения, развитые несколько севернее исследуемой территории, датированы плиоценом. Они слагают остатки древних террас этой реки и располагаются на абсолютных отметках 50-200 м. К аллювиальным образованиям ранне-неоплейстоценового времени отнесены отложения V террасы, развитые на водоразделе в долинах рек Келимяр и Никабыт, в средних течениях таких рек, как Молодо, Сюнгюде, Джарджан, Натара. Отложения представлены в верхней части галечно-гравийно-песчаной смесью, галька мелкая, хорошо окатанная. Цвет отложений красновато-серый. В основании разреза отмечены песчано-глинистые алевролиты.

Нижнее звено (Q₁)

Нижнее звено подразделено на пеледуйскую и оручанскую свиты. Они представлены аккумулятивными отложениями аллювиальных высоких цокольных террас. Абсолютная высота террас составляет от 50 м до 160 м (пеледуйская) и от 80 до 150 м (оручанская). Аллювиальные отложения этих террас, вложенные в образования эоплейстоценовых террас, на Оленекском своде залегают на коренных докайнозойских породах и перекрываются поздне-неоплейстоценовыми льдистыми (пост-ледниковые отложения) накоплениями. На Приверхоянской равнине пеледуйская свита сложена аллювием ленской террасы, которая залегает на цоколе (он сложен породами нижнего мела), и перекрывается аллювиальными, ледниковыми образованиями неоплейстоцена.

Среднее звено (Q₂)

Среднее звено представлено бестяхской свитой. Она сложена аккумулятивными отложениями аллювиальных цокольных террас и гляциальными, гляцио-флювиальными

образованиями. Бестяхская свита распространена по всему району исследования. Накопления тазовского горизонта встречены только на Предверхоянской равнине.

Аллювиальные отложения времени максимального оледенения (Q₂)

Отложения, отнесенные к аллювию времени максимального оледенения, развиты гипсометрически на уровне 80-130 м. Они выделяются по левым притокам рек Келимяр и Никабыт и в обрывах правого берега р. Хорбусуонки на абсолютных отметках 80-90 м, а также на водоразделе рек Келимяр и Никабыт, Молодо, Беенчине на абсолютных отметках 120-130 м. Различному гипсометрическому положению они обязаны молодым тектоническим движениям.

Аллювий представлен супесчаным и песчаным материалом с большим количеством мелкой различно окатанной гальки разнообразного петрографического состава (аргиллиты, алевролиты, карбонаты, гранитоиды, гнейсы и другие породы). Преобладает галька небольшого размера, не превышающая 3-5 см в поперечнике, часто слабой окатанности. Последнее особенно характерно для галек алевролитового и аргиллитового состава. Мощность отложений достигает 10 м.

Среднее-верхнее звенья (Q₂₋₃)

Отложения представлены покровными образованиями: как озерно-аллювиальными, так и аллювиальными, залегающими на обширных площадях по всей территории на различных гипсометрических уровнях. Они представлены средне-верхне-неоплейстоценовым лимноаллювием и мавринской свитой, также имеют аллювиальные отложения террас, развитые также в долинах Келимьяра и Никабыта. Отложения террас представлены в верхней части серыми суглинками, ниже гравийно-песчано-галечными отложениями, с глинисто-алевритистым заполнителем. Пески имеют кварц-полевошпатовый состав. Галька преимущественно хорошо окатанная размером от 1-5 см, реже до 8-12 см и характеризуется очень разнообразным петрографическим составом. В верхней части слоя окраска красновато-серая.

Присутствует галька карбонатных, мергелистых и кремнистых пород, песчаников, алевролитов, аргиллитов, кварца, гнейсов, гранитоидов и других пород. Мощность отложений 5-7 м.

Средне-верхне-неоплейстоценовый лимноаллювий (Q_{2-3 lm-al})

Водно-ледниковые отложения времени зырянского оледенения. К водно-ледниковым отложениям условно отнесены разрозненные валуны и глыбы пород разнообразного петрографического состава, слагающие покровные и долинные зандры. Они встречаются в долинах левых притоков р. Келимяр, в предгорьях Верхоянья, в притоках рр. Молодо и Оленек.

Долинные зандры образуют полосы шириной от 500 м до 2 км вытянутые в северном, северо-западном и субширотном направлении. Отложения представлены илами темно-коричневого цвета, песчано-гравийно-галечными отложениями с мелкими валунами. Встречаются экзотические породы, представленные кремнями, кварцем, валунами кварцитов. Валунны имеют состав, характерный как для местных пород, так и для принесенных издалека.

Покровные зандры развиты преимущественно в центральной и северной части исследуемой территории. Отложения представлены водораздельными галечниками, галечно-гравийно-песчаной смесью с мелкой, хорошо окатанной галькой. В отложениях отмечены находки пиропов, пикроильменитов, в водораздельных галечниках встречены зерна оливина. Цвет отложений красновато-серый.

Лимноаллювий распространен в западной части территории исследования на гипсометрических уровнях от 100-150 м и перекрывает пермские, триасовые и неогеновые породы. Лимноаллювий представлен песками мелко- и среднезернистыми с рассеянными гальками, с прослоями супесей и, реже, суглинков. Максимальная мощность - до 30 м.

Озерно-аллювиальные отложения межледникового времени (Q_3^1)

К верхнечетвертичному межледниковью отнесена толща светло-желтых супесчаных и суглинистых осадков, перекрывающая по левым берегам рек Келимяр и Никабыт аллювий времени максимального оледенения. Эта толща весьма однообразна по составу. Наблюдаются лишь маломощные прослой торфа, обломки древесины и разрозненная галька преимущественно карбонатного состава. Нередко встречаются клинья ископаемого льда мощностью до 2 м. Мощность озерно-аллювиальных осадков до 20 м. Характер материала, а также то, что ниже он переходит в аллювий времени максимального оледенения, позволяет считать эти отложения озерно-аллювиальными предположительно межледникового возраста.

Аллювиальные отложения каргинского времени (Q_3^1)

Каргинские отложения составляют верхнюю часть террасовых уровней рр. Молодо, Натара, Джарджан, Хорбусуонка, Никабыт и Келимяр высотой 20-30 м (на геологической карте они не показаны).

Эти отложения представлены переслаивающимися горизонтами супеси, суглинка и галечников, содержащими большое количество обломков древесины, а также прослой и линзы торфа. Нередко супеси и суглинки включают кости млекопитающих, преимущественно бивни и зубы мамонтов.

Спорово-пыльцевой спектр отложений второй надпойменной террасы р. Келимяр свидетельствует о произрастании в то время березово-пихтовых и лиственных лесов, а также осок, зеленых и сфагновых мхов, вересковых.

Мощность аллювия 12-15 м.

Голоцен Q₄

Голоценовые отложения представлены следующими генетическими типами: пойменный и русловой аллювий, лимний и палюстрий, эоловые образования.

Аллювиальные отложения современного отдела слагают высокую пойму, пойму, а также выполняют современные русла рек. Они представлены галечно-суглинистым материалом, причем в их строении преобладает галечник.

Отложения того же типа отмечены в составе высокой и низкой поймы в долине рр. Лена, Келимяр, Ньеёкю, низовья Молодо и Муна. Русловые отложения, в зависимости от характера размываемых пород, представлены песчано-глинистым или галечным материалом, кроме этого в состав входят валунники, галечники, гравийники, пески, алевриты, супеси, суглинки, в прослоях - торф, остатки древесины. Они развиты преимущественно на прирусловых отмелях. Мощность - до 30 м. В районах Оленекского свода, и на юге Предверхоянской наклонной равнины голоценовый аллювий вмещает крупные россыпные месторождения алмаза, золота, отдельные находки, шлиховые потоки и ореолы алмаза, золота, платины [Граханов, 2007].

Русловые отложения отличаются от пойменных более хорошей степенью промытости материала, притом что грубообломочный состав аллювия соответствует гранулометрии пойменных и террасовых отложений. Галька и валуны в составе аллювиальных толщ представлены карбонатными породами.

Лимний и палюстрий также распространены повсеместно по территории исследования, включают в себя суглинки и илистые супеси, ил, алевриты, глины ленточнослоистые, пески, растительные остатки, в прослоях и линзах - торф и лед, клинья ископаемого льда. Мощность - до 20 м.

Элювиально-делювиальные. Эолий развит на денудационных поверхностях плато, на Оленекском и сочленении Виллюйской и Предверхоянской равнин и на куэстовых поверхностях на востоке. Представляет собой суглинки лёссовидные, супеси, алевриты и пески мелкозернистые горизонтально- и косослоистые с растительными остатками, в прослоях - ископаемая почва. Мощность - от 1-4 до 30 м.

Болотные отложения широко развиты в пределах района исследования и связаны, в первую очередь, с подпруживанием русла в пойменных отложениях и на террасах. В другом случае, болота развиты на водоразделах из-за близкого залегания к поверхности

многолетнемерзлых пород. Они образовались в начале голоцена в связи с потеплением климата и таянием мерзлоты. Болотные отложения – это, преимущественно, илы с большим количеством торфа.

Солифлюкционные образования связаны с течением рыхлых сильно переувлажненных масс грунта по пологим склонам при оттаивании с образованием оплывин. Характеризуются слабой сортировкой и включением неокатанных или слабоокатанных обломков горных пород в преобладающей суглинистой и глинистой массе. Мощность этих образований достигает 10 м и более. Развита у подножий террас в долине р. Келимьяр и менее крупных рек и ручьев.

Магматические образования

Магматические образования на рассмотренной территории представлены раннепротерозойскими, рифейскими, среднепалеозойскими и мезозойскими интрузиями кислого, основного, щелочно-ультраосновного (кимберлиты) составов. Наиболее распространены триасовые базальтоиды, слагающие площади в центральной части листа. Часто встречаются юрские кимберлитовые образования (трубки взрыва). Интрузии гранитоидов обнажены локальными участками.

Раннепротерозойские магматические образования (γPR_1). Представлены, главным образом, субщелочными габброидами и гранитоидами (рис. 1.3.2). Наиболее древними являются субщелочные габброиды Мунского погребенного массива на юге территории. Массив на 66 м вскрыт скважиной. Вскрытая часть массива выполнена светло-серыми с красноватым оттенком среднекрупнозернистыми породами с габбровой структурой. Верхние 50 м сложены крупно- и грубозернистыми породами пегматоидного облика, нижние 16 м представлены крупно- и среднезернистыми базитами со слабопроявленной расслоенностью, обусловленной чередованием лейкократовых и меланократовых полос. Возраст пород составляет 2326 ± 7 млн лет [Томшин, 2007].

Геологическая карта R-51

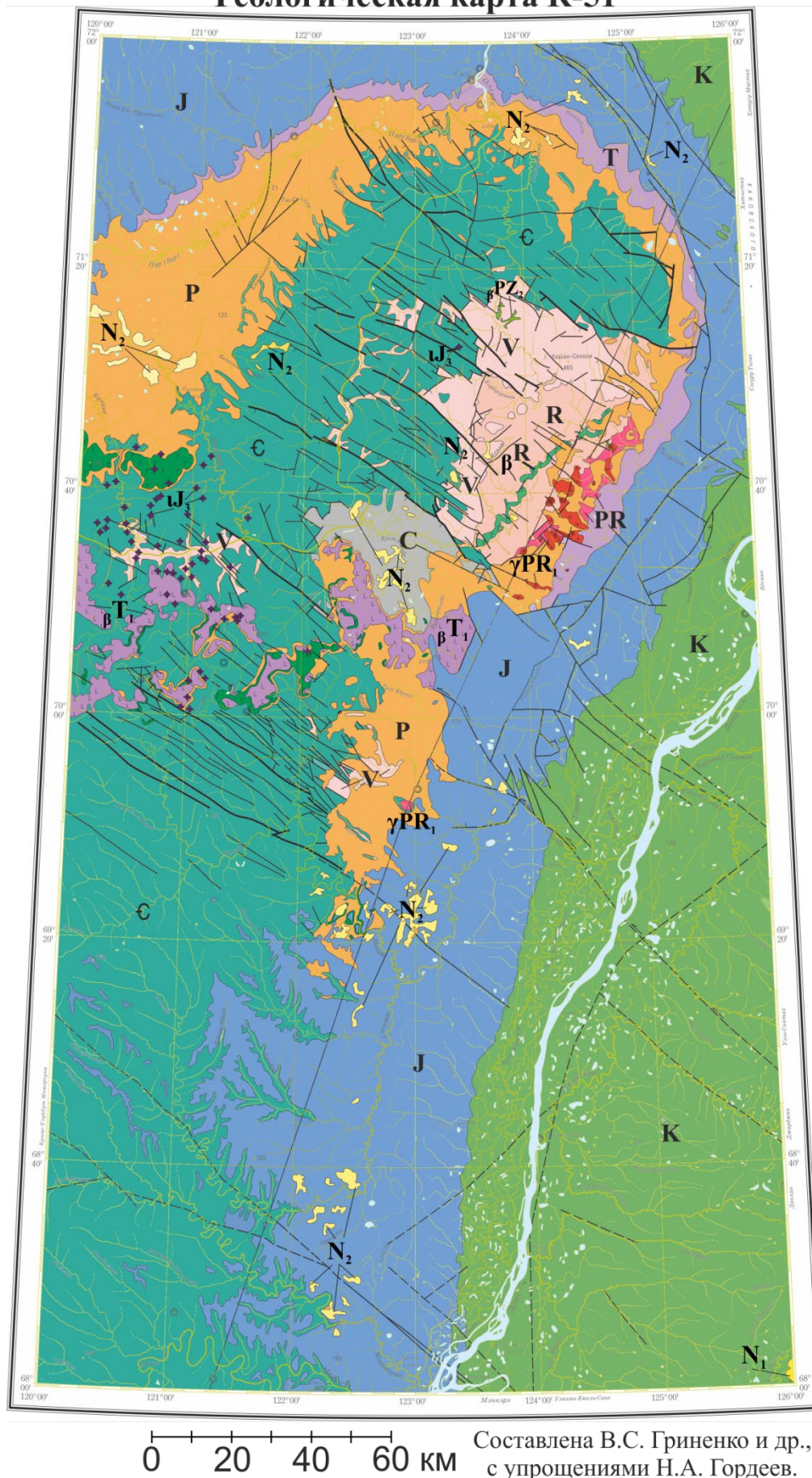


Рис. 1.3.2. Упрощенная геологическая карта [по материалам ГГК РФ, R-51, 2013].

У С Л О В Н Ы Е О Б О З Н А Ч Е Н И Я

НЕОГЕНОВАЯ СИСТЕМА	ПЛИОЦЕН	N ₂	Толща брекчий со щебнем и глыбами доломитов, известняков, алевролитов, песчаников, галечники, ожелезненные пески, конгломераты (от 15-600 м);	
	МИОЦЕН	N ₁	Пески, базальные галечники, прослои гравийников и глин (более 50 м);	
МЕЛОВАЯ СИСТЕМА		K	Алевролиты, песчаники, аргиллиты с линзами гравелитов и конгломератов, доломиты, в разных частях разреза присутствуют угленосные толщи (до 1200 м);	
	ПОЗДНЕЮРСКИЕ ИНТРУЗИВНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ		Трубки, кимберлитовые брекчии, массивные, автолитовые кимберлиты, базальтоидные и слюдяные;	
ЮРСКАЯ СИСТЕМА		J	Пески, песчаники, алевролиты, аргиллиты (битуминозные), известняки, глины, включения известково-глинистых конкреций, местами зерна глауконита в аргиллитах (до 700 м);	
ТРИАСОВАЯ СИСТЕМА		T	Песчаники, аргиллиты, алевролиты, известняки, туфы, туфоалевролиты, туфогравеллиты, туфоконгломераты (до 550 м);	
	РАННЕТРИАСОВЫЕ ИНТРУЗИВНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ		Силлы долеритов;	
ПЕРМСКАЯ СИСТЕМА		P	Серые песчаники средне- и мелкозернистые с прослоями плотных песчаников мелко-среднезернистых, линзы прослоев алевролитов и углистых сланцев, метаморфизованные сланцы, магматические породы среднего состава, битуминозные сланцы и известняки (до 985 м);	
КАМЕННОУГОЛЬНАЯ СИСТЕМА		C	Мергели, известняки, доломиты, конгломераты и песчаники, алевролиты и гипсы и гравелиты (до 240 м);	
	СРЕДНЕПАЛЕОЗОЙСКИЕ ИНТРУЗИВНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ		Силлы умереннощелочных высокотитанистых долеритов;	
КЕМБРИЙСКАЯ СИСТЕМА		Є	Известняки, реже мергели, нередко глинистые мергели, темно-серые сланцы, доломиты (до 1824 м);	
ПРОТЕРОЗОЙ	ВЕРХНИЙ	ВЕНДСКАЯ СИСТЕМА	V	Песчаники, доломиты и известняки (до 400 м);
		СРЕДНЕРИФЕЙСКИЕ ИНТРУЗИВНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ		Силлы долеритов, кварцевых долеритов;
	НИЖНИЙ	РИФЕЙ	R	Песчаники кварцевые, полевошпат-кварцевые зеленовато-серые с линзовидными прослоями кварцито-песчаники глауконитовых, гравелитов, конгломератов, алевролитов; в основании залегают валунно-галечные кварцевые конгломераты, гравелиты, песчаники (до 1680 м);
		РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИЕ ИНТРУЗИВНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ		Граниты биотитовые, гранодиориты, редко кварцевые диориты, диориты, сиенит-диориты;
		РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИЕ ИНТРУЗИВНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ		Сланцы, филлиты, метапесчаники, металевролиты, кварциты, метавулканиты, метариодациты, метатрахидациты, маломощные прослои туфов, туффитов (до 2600м);
	РАННЕПРОТЕРОЗОЙСКИЕ ИНТРУЗИВНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ		Мунский массив. Габброиды умереннощелочные. Нет на карте.	

*Структуры на схемах корреляции дочетвертичных образований и геологического районирования

*Структуры на схемах корреляции дочетвертичных образований и геологического районирования



Граниты



Граносиениты



Габбро-долериты, долериты



Базальты

Геологические границы между разновозрастными геологическими подразделениями

Разрывные нарушения

(а – достоверные, выходящие на картографируемую поверхность, б – предполагаемые, выходящие на картографируемую поверхность, в – достоверные, скрытые под вышележащими образованиями, г – предполагаемые, скрытые под вышележащими образованиями)

Главные



Неясной кинематики



Сбросы

Второстепенные



В бассейне р. Сололи в породах нижнего протерозоя обнаружены мелкие штоки и пластовые тела метариолитов. Размеры штоков варьируются от первых метров до 30 м в поперечнике, мощность пластовых тел не превышает 5 м. С ними пространственно ассоциируют комагматичные металавы и метатуфы.

Штоки и пластовые тела сложены однообразными массивными светло-розовато-серыми, зеленовато-серыми микрозернистыми риолитами афирового и порфиривого строения.

Данные магматические тела распространены локально, слабо изучены. Развитие магматических тел происходило, вероятно, в этапы внутриплитного магматизма.

Магматические образования рифея (βR). Представлены интрузивами основного состава, это силлы долеритов и кварцевых долеритов и дайки долеритов. Распространены вдоль субширотных разрывных нарушений в области Сололийского поднятия, которые сформировались в 100-150 м от поверхности в результате вулканических извержений центрального типа.

Среднепалеозойские магматические образования (βPZ_2). Представлены долеритами (умеренно-щелочными), распространены и обособлены на Олонгдо-Хорбусуонском ареале в северо-восточной части. Образуют вертикальные дайки северо-западного простирания протяженностью ~10 км, мощностью от 3-6 км.

Мезозойские магматические образования. Представлены раннетриасовыми долеритовыми и позднеюрскими кимберлитовыми образованиями.

Раннетриасовые (βT_1) силлы и дайки распространены в бассейне рек Далдын, Ырас-Юрях, Толуопка и левых притоков р. Кютингде, где образуют пластовые, пологопадающие и дайкообразные тела долеритов и габбро-долеритов протяженностью до нескольких 10-ков км, и мощностью до 10 м.

Позднеюрские (βJ_3) кимберлитовые образования локализованы в верховьях р. Хорбусуонка, и на западе центра района исследования в пределах рек Молодо, Толуопка и Оленек. Кимберлиты массивные, базальтоидные, слюдяные, автолитовые, с наличием кимберлит-минералов-индикаторов (например пироп) и алмазов.

Тектоническое строение района исследований

Рассматриваемая территория охватывает северо-восточную окраину Восточно-Сибирской платформы (рис. 1.3.3). Она расположена в районе сочленения Анабарской антеклизы и внешнего крыла протяженного краевого прогиба Сибирской платформы (Лено-Анабарский и Предверхоянский прогибы). На востоке Анабарской антеклизы выделяются (с севера на юг) Оленекский свод и ограничивающий территорию исследования Мунский свод. В пределах первого локализованы Сололийское и Куойкско-Далдынское поднятия, разделенные Кютингдинским грабеном, что видно на тектонической схеме (рис. 6).

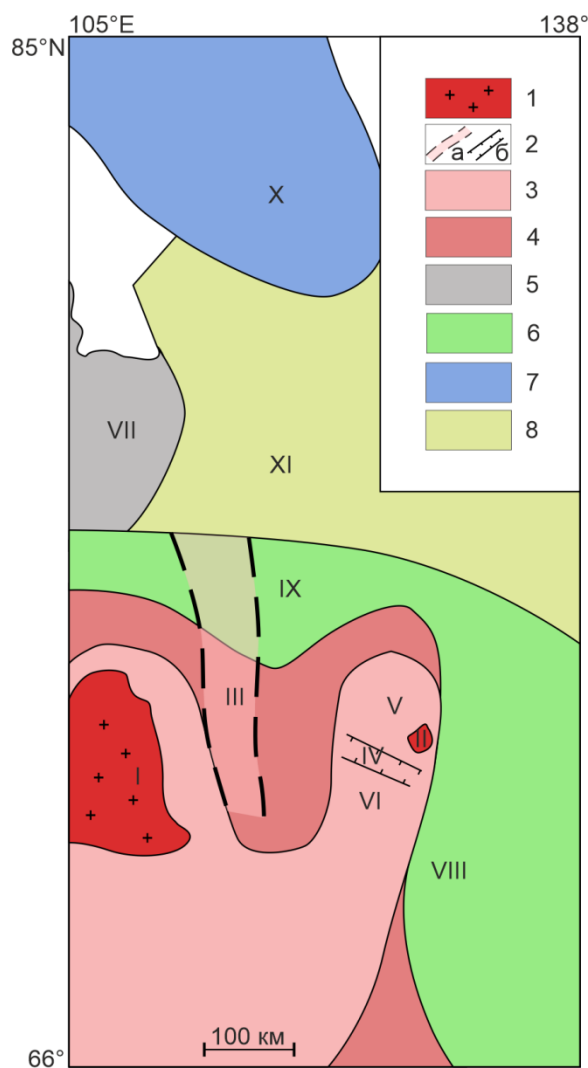


Рис. 1.3.3. Схема тектонического районирования Сибирской платформы и смежных складчатых областей [по Е.Е. Милановскому, 1996; по В.С. Полянину, 2014] с упрощением и дополнением Н.А. Гордеева:

1 – щиты и другие выступы фундамента (протерозойского возраста): I – Анабарский свод, выступ древнего щита, II – Сололийский выступ; 2 – грабены и впадины, выполненные верхнепротерозойскими (а) и мезозойскими (б) отложениями: III – Уджинский авлакоген, IV – Кютингдинский грабен; 3-4 – антеклизы и своды в сложных антеклизах платформы (где 3 – погружение от 0 км до 3-х км, а 4 – погружение от 3-х км до 6 км) (протерозой-палеозойские структуры): V – Оленекский свод (Сололийское поднятие), VI – Мунский свод (Куойско-Далдынское поднятие); 5 – Область развития каледонидов и герценидов п-ова Таймыр; VII – п-ов Таймыр; 6 – позднекиммерийские краевые прогибы (мезозоиды): VIII – Предверхоянский краевой прогиб, IX – Лено-Анабарский прогиб (Хастахский прогиб); 7 – глубокоководные впадины с корой субокеанического типа (палеоцен): X – Срединно-океанический хребет Гаккеля; 8 – структуры рифтовых осадочных бассейнов моря Лаптевых: XI – системы северо-западных рифтогенных структур верхнее-мелового-палеогенового возраста.

На северо-востоке Сололийского поднятия находится Хорбусуонский рифтогенный прогиб, а к северо-западу от поднятия расположен Хастахский прогиб. Между сводовыми структурами протягивается Кютингдинский грабен. Нижнепротерозойские породы выходят на поверхность в Олонгдинском и Верхнеэекитском (Сололийское поднятие), Салабынском (Куойкско-Далдынское поднятие) выступах кристаллического фундамента. На востоке расположен Предверхоянский краевой прогиб, структуры которого представлены Атырканской седловиной на востоке территории листа карты.

На северо-востоке Сололийского поднятия находится Хорбусуонский рифтогенный прогиб, а к северо-западу от поднятия расположен Хастахский прогиб. Между сводовыми структурами протягивается Суханская впадина. Нижнепротерозойские породы выходят на поверхность в Олонгдинском и Верхнеэекитском (Сололийское поднятие), Салабынском (Куойкско-Далдынское поднятие) выступах кристаллического фундамента. На востоке расположен Предверхоянский краевой прогиб.

К древним структурам протерозоя относятся Оленекский, Мунский своды. В рифее образовалась Хатангская впадина. Эти структуры развиваются по настоящее время и являются унаследованными (рис. 1.3.4, рис. 1.3.5) на палеозойском этапе развития. К структурам, образовавшимся в раннем палеозое, относятся Сололийское, Куойкско-Далдынское поднятия, разделенные Кютингдинским грабеном. В среднем палеозое проявились структуры Лено-Анабарского (на 3D модели фундамента схеме Оленек-Анабарский (рис.1.3.7)) и Предверхоянского прогибов. В настоящее время унаследованной структурой остался Лено-Анабарский прогиб (частично, так как на месте его развития в новейший этап сформировалось поднятие кряжа Чекановского (глава 3)), а Предверхоянский и часть Лено-Анабарского прогибов являются инверсионными структурами. На сочленении прогибов в мезозой-кайнозойский этап образовался Кряж Чекановского, отделенный Келимярским прогибом от Оленекского поднятия. Над Предверхоянским прогибом, вместе со структурой раннего палеозоя-позднего протерозоя – Суханской впадиной – и северной окраиной Мунского свода, образовались вытянутые субмеридионально Мунско-Суханское и Мунско-Сюнгюдинское новейшие поднятия (подробнее в главе о новейшей тектонике) (рис. 1.3.7).

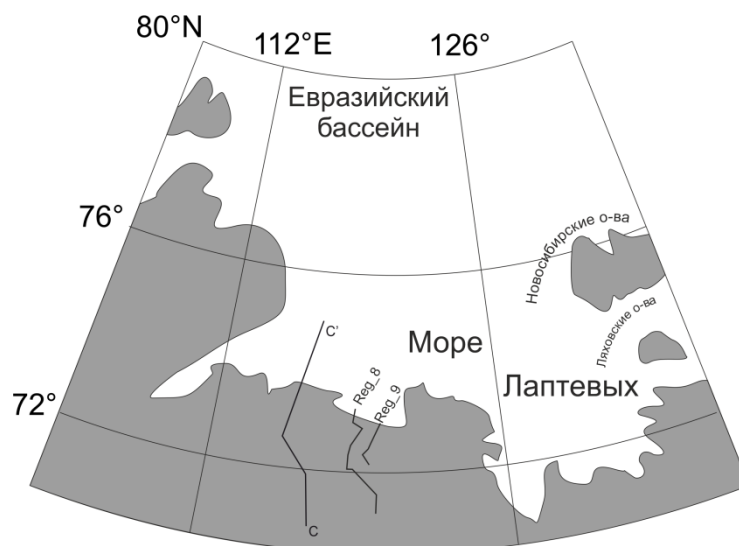


Рис. 1.3.4. Расположение разрезов C-C', Reg_8 и Reg_9.

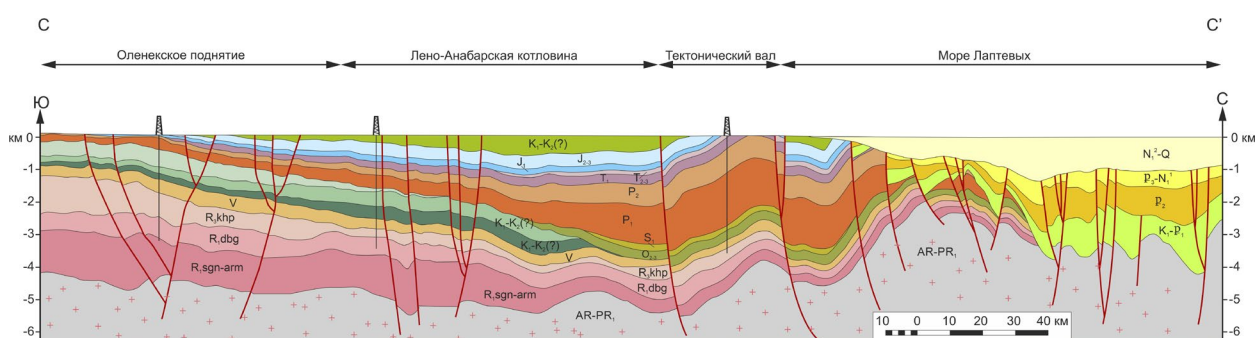


Рис. 1.3.5. Геологический разрез через линию C-C'. По материалам [Фролов, 2017; Frolov; 2015]. С изменениями Н.А. Гордеев.

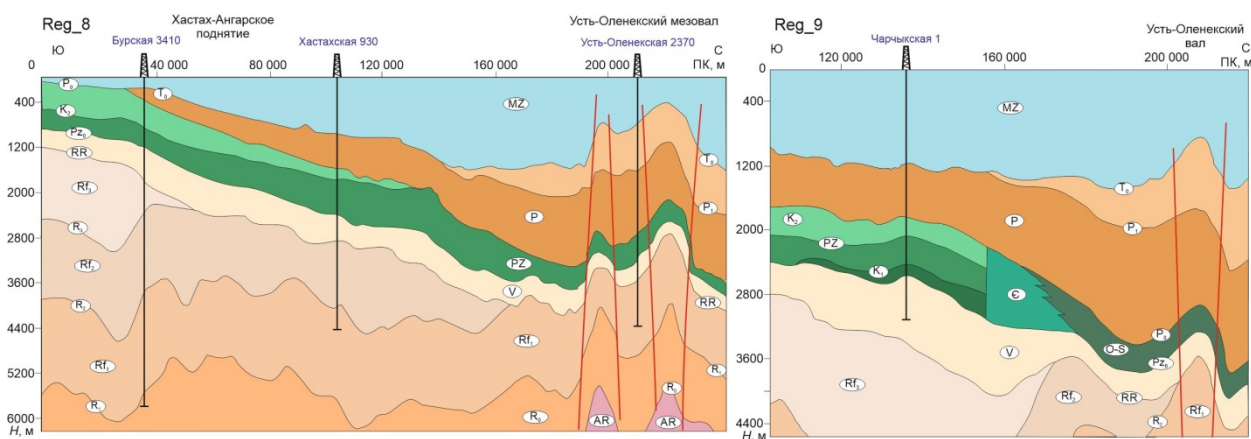


Рис. 1.3.6. Геолого-геофизические разрезы через линии Reg_8 и Reg_9. По материалам [Конторович, 2013]. С упрощениями Н.А. Гордеев.

Унаследованность устанавливается по двум критериям: по характеру распространения осадочных отложений и по выраженности структур фундамента в новейших. По первому критерию установлено, что в развитии Лено-Анабарского прогиба (по разрезу (см. рис. 1.3.5) «котловина») мощности отложений стабильно больше, чем на

территории развития Оленекского свода (поднятия). Это говорит о постоянном прогибе первого, а значит – о его унаследованности. В области Оленекского поднятия заметны этапы: 1) зарождение структуры поднятия в фундаменте (отложения протерозоя), 2) длительный этап погружения (с протерозоя до нижнего палеозоя), 3) продолжительный этап выравнивания (с конца верхнего кембрия по начало перми), 4) формирование маломощных отложений перми, юры, триаса, снос этих же отложений в прилегающие прогибы. Все это говорит о стабильном воздымании Оленекского поднятия с перми по палеоген. В палеогене происходит длительный этап выравнивания. Вышеперечисленные данные в совокупности свидетельствуют об унаследованности развития Оленекского свода одноименным поднятием с позднего палеозоя. Кряж Чекановского является инверсионной структурой Лено-Анабарского (Оленек-Анабарского) прогиба в новейший этап, в связи с тем что в современном рельефе наблюдается его интенсивное поднятие. Тоже самое касается и развития Верхоянья.

Для построения полной геологической 3D модели на настоящий момент недостаточно данных по скважинам и геофизики, в связи с этим вопрос об унаследованности Кютингдинского грабена только предстоит прояснить. Однако можно утверждать, что на территории этой структуры проявление грабена в фундаменте совпадает с впадиной в новейшей структуре. В настоящий момент установлено, что в области Кютингдинского грабена было как минимум два этапа растяжения в среднем палеозое и среднем мезозое [Об.зап., R-51, 2013]. Подытоживая имеющуюся информацию, можно заключить, что данная структура имеет как минимум два этапа активизации, что означает, что унаследовано она могла развиваться только с середины мезозоя.

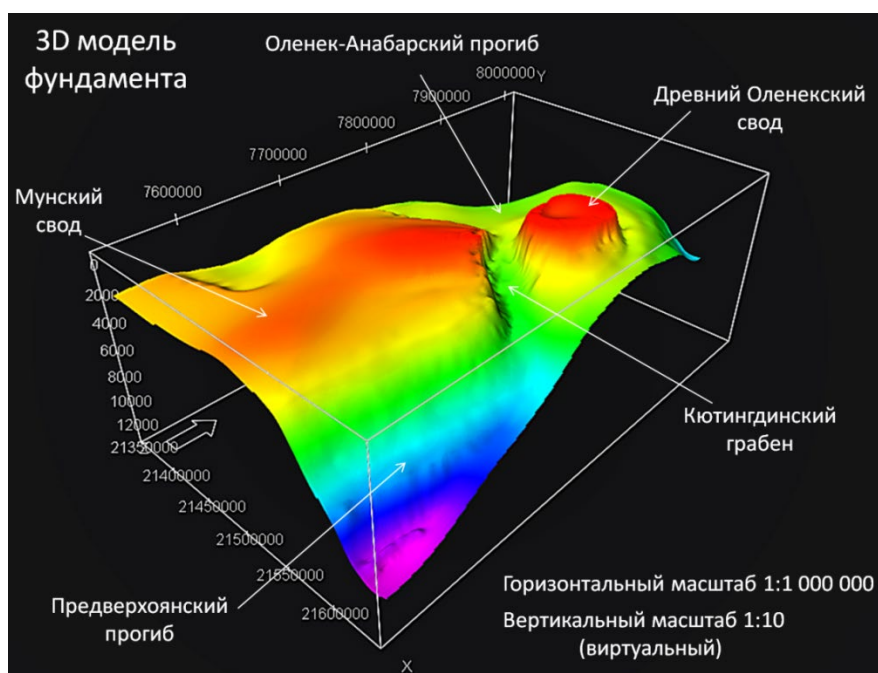


Рис. 1.3.7. Поверхность фундамента. Стрелкой показано направление на север.

Разрывные нарушения

В структуре Оленекского поднятия наблюдаются многочисленные разрывные нарушения, которые, по данным геологической съемки [ГГК, R-(50)-52, 1983; ГГК, S-50, S-51, S-52, 2011; ГГК, R-51, 2013; ГГК, R-52, 2016; ГК СССР, 1975; ГК СССР, 1965], в основном имеют сбросовую кинематику, и являются либо вертикальными, либо крутопадающими. Разрывами нарушены породы фундамента и осадочного чехла. Преобладающими являются разрывы северо-западной ориентировки ($300-320^\circ$), проявленные на поверхности линеаментами. На северо-восточном крыле Оленекского поднятия присутствуют разрывы северо-восточного простирания ($20-30$ до 40°). В области распространения кембрийских отложений выделяются узкие зоны субширотных (восток-северо-восточных) разрывов с азимутами простирания СЗ $75-80$, которые протягиваются вплоть до южного окончания территории исследования. Они рассекают одновременно и чехол, и фундамент. Вероятно, они унаследованы от древних разрывов. В северной части поднятия разрывные нарушения имеют преимущественно северо-западное и северо-восточное простирания. Интрузии по крупным разрывам среднего состава, протерозойского и триасового возрастов развиты в центральной части (Сололийское поднятие), и южнее Кютингдинского грабена [Горнштейн, 1976].

ГЛАВА 2. Методика исследования

В процессе написания работы были использованы различные методы изучения геологического строения территории исследования.

В полевых маршрутах проводилось непосредственное изучение особенностей геоморфологии, включая строение речных долин, склонов водоразделов и др. Были исследованы коренные и четвертичные отложения, такие как аллювий речных террас, делювий на склонах и др. В том числе проводилось шлиховое опробование (промывка проб рыхлых аллювиальных отложений), описание кернового материала.

В камеральных условиях применялись геологические, структурно-геоморфологические, тектонофизические и другие методы.

2.1. Структурно-геоморфологический метод

При изучении геологического строения рассматриваемой территории были использованы разнообразные литературные и фондовые материалы, в том числе, результаты геологической съемки масштаба 1:500 000 и 1:1 000 000, геофизические материалы, которые дают информацию о глубинном строении территории [neotec.ginras.ru; yandex.ru; eorc.jaxa.jp/ALOS/en]. Большое внимание уделялось изучению разрывных нарушений, осложняющих строение кристаллического фундамента и осадочных толщ. Эти данные дают возможность выявить зоны трещиноватости, установить проявления разрывов в рельефе.

Изучение района производилось по методике (структурно-геоморфологический метод), разработанной Макаровым и Костенко [Макаров, 1997, Костенко, 1999]. Структурно-геоморфологический анализ позволяет выявить связь рельефа с неотектоническими, в том числе, современными движениями. Этот метод применялся как в полевых, так и в камеральных условиях. В результате проведения 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.

Исходными данными для работы структурно-геоморфологическим методом являются разномасштабные топографические карты, или построенные карты изолиний по цифровой модели рельефа (ЦМР) [geodisaster.ru] (это оправдано в случаях, когда ЦМР имеет более высокое разрешение, чем топографическая основа, и не имеет артефактов, или если топографическая основа составлена раньше 1960-х гг.).

Выделение структур рельефа на карте сопровождается построением геоморфологических и геолого-геоморфологических профилей (рис. 2.1.1), на которые

наносятся имеющиеся геологические данные по разным источникам: коренные и новейшие отложения, достоверные и предполагаемые разрывные нарушения, линеаменты, поверхности выравнивания. Проводятся профили по водоразделам как вкрест основных неотектонических структур, так и вдоль их простирания. Геолого-геоморфологические профили дают возможность выделить новейшие поднятия и прогибы, определить более точное положение уступов и выровненных поверхностей, увидеть характерные черты их морфологии, подчеркнуть возможные деформации или другие особенности их строения (рис. 2.1.2)

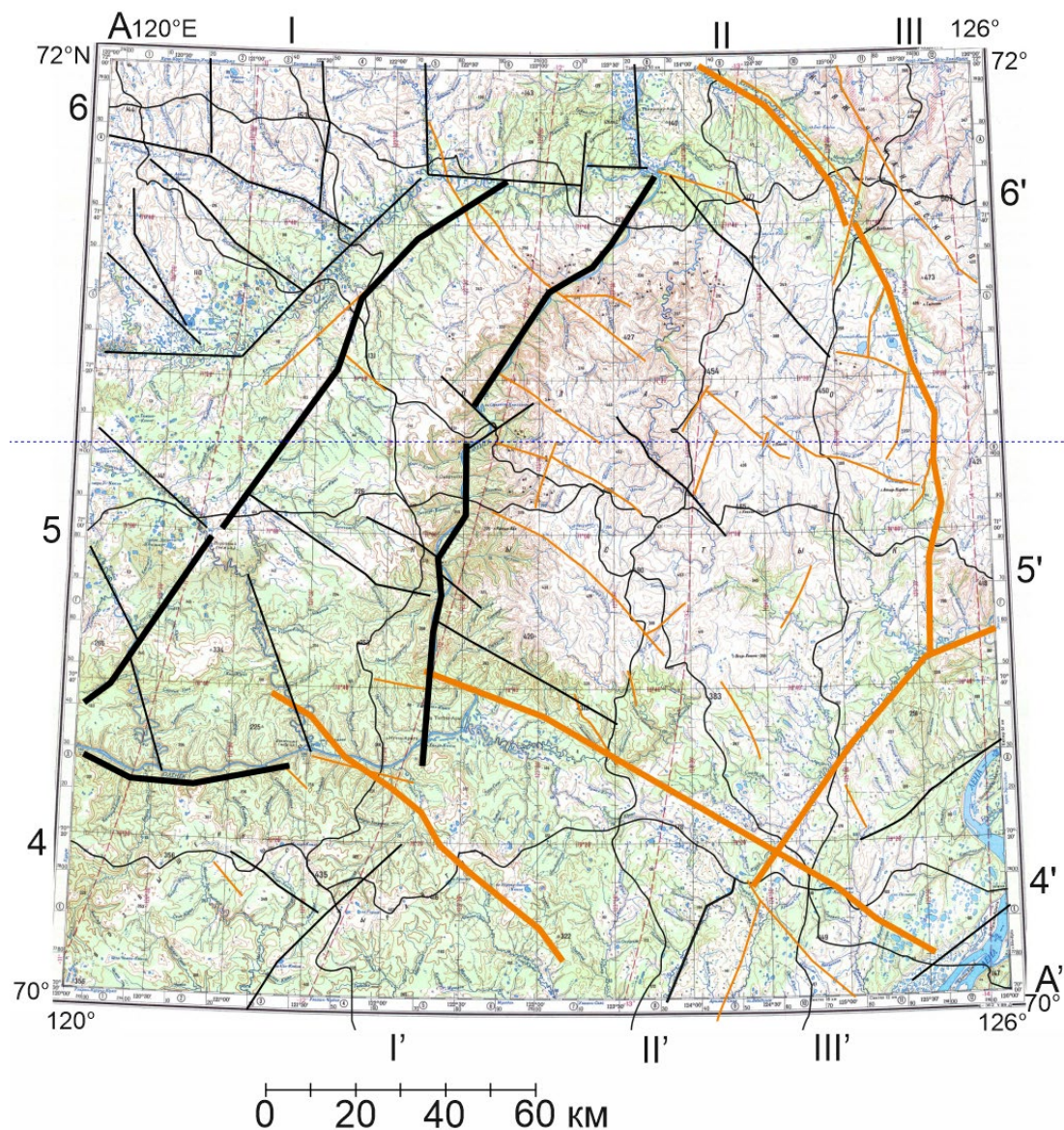


Рис. 2.1.1. Расположение геоморфологических профилей на топографической основе масштаба 1:500 000. Чёрные линии – линеаменты: толстые – первого ранга, тонкие – второго ранга; оранжевые линии – разрывы: толстые – первого ранга, тонкие – второго ранга. Линии геоморфологических профилей показаны волнистыми линиями с обозначением начала и конца профиля цифрой или буквой.

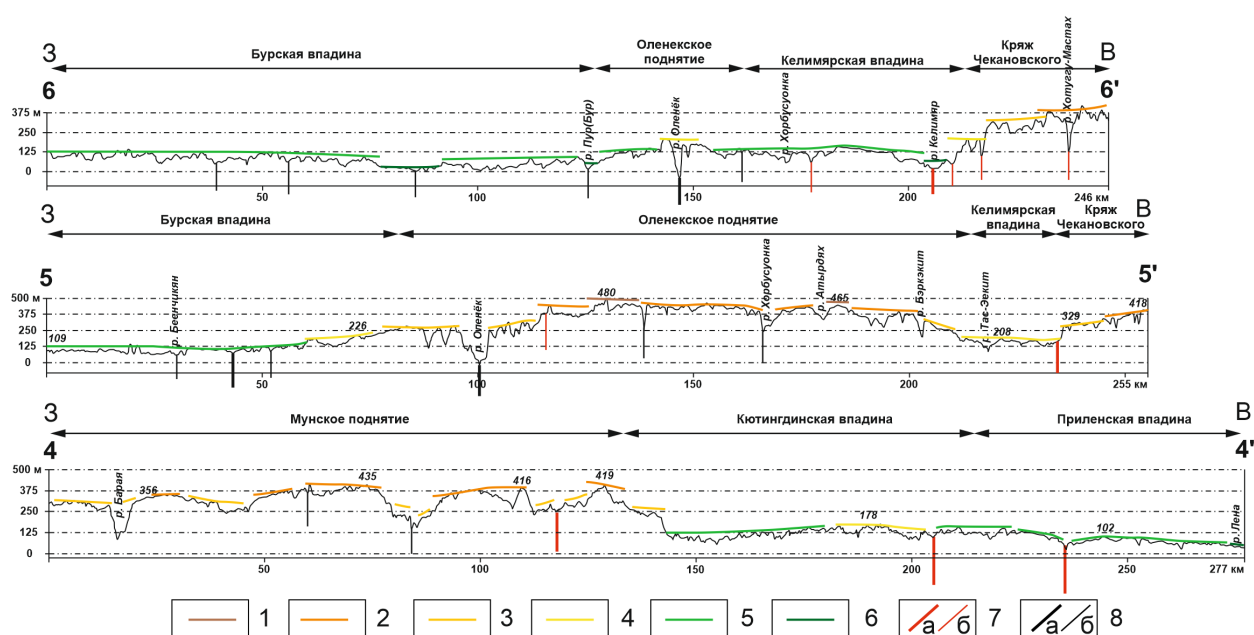


Рис. 2.1.2. Геоморфологические профили по центральной части исследуемой территории.

1-5 – разновысотные поверхности выравнивания (не расчлененные по возрасту): 1 – 450-500 м; 2 – 350-450 м; 3 – 250-350 м; 4 – 150-250 м; 5 – 10-150 м; 6 – русло и пойма рек; 7-8 – разрывные нарушения по разным данным: 7 – разрывы по [ГТК, R-(50)-52, 1983; ГТК, R-51, 2013]: а) первого ранга, б) второго ранга; 8 – дешифрованные разрывы: а) первого ранга, б) второго ранга.

В результате получается структурно-геоморфологическая карта/схема (если на ней выделены разрывные нарушения, террасы, поверхности выравнивания), карту/схему новейшей тектоники (если на ней показаны амплитуды вертикальных колебаний и разрывные нарушения) или карта/схема новейших пликативных и дизъюнктивных структур (если основное внимание уделено выделению границ новейших поднятий, впадин и секущим их разрывам).

2.2. 3D геологическое моделирование

На современном этапе развития геология не может обойтись без привлечения физико-математических абстракций и моделей: "Только на основе трехмерных сейсмических построений оказалось возможным изучение и понимание уникальных по своей природе и эволюции тектонических структур в чехле осадочных бассейнов, с их сложной историей развития, изменчивым во времени напряженным состоянием и важной ролью новейших сдвиговых деформаций в формировании сопровождающих их структурных и флюидодинамических парагенезов." [Тимурзиев, 2012].

Для установления взаимосвязи глубинных структур с новейшими применен метод 3D геологического моделирования. 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 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 были переработаны в 3D модель.

Из-за недостаточного количества скважинных данных и геофизических профилей построение более полной 3D геологической модели на настоящий момент затруднительно. В связи с этим на момент предоставления диссертационной работы имеются данные по цифровой модели рельефа (Aster GDEM с разрешением до 30 м) и поверхность кристаллического фундамента.

2.3. Линеаментный анализ

Термин «линеамент» в работе понимается в соответствии с определением А.И. Полетаева как линия резкого (градиентного) изменения географической среды, геологического строения и геофизических полей [Полетаев, 2001].

В геологической практике выявления и изучения линеаментов используются прямые и косвенные методы.

Прямые методы основаны на дешифрировании протяженных прямолинейных элементов рельефа, пересекающих (непрерывно или прерывисто) площадь исследования по топографическим картам или космическим снимкам.

Косвенные методы связаны с поиском, выделением и трассированием линеаментов по данным геофизических (гравитационные, магнитные поля) и геохимических полей.

Классификация линеаментов остается одним из нерешенных вопросов. В.И. Макаров [1981] указал, что не существует такой классификации линеаментов, которая полностью бы решила вопросы их происхождения, развития и типизации.

Попытка создания наиболее универсальной классификации предпринята в работе О.М. Борисова и А.К. Глуха [1982]. Краткая классификация:

1. Линеаменты географической среды: тополинеаменты, выделяемые по топографической карте; батилинеаменты – по батиметрической карте; фотоллинеаменты – по аэрофотоснимкам; космолинеаменты – по космическим снимкам.

2. Линеаменты геологической структуры: геолинеаменты, выделяемые по геологической карте; тектонолинеаменты – по тектонической карте; металлолинеаменты – по металлогенической карте; гидролинеаменты – по гидрогеологической карте.
3. Линеаменты геофизических и прочих полей: магнитолинеаменты, выделяемые по карте аномального магнитного поля; гравилинеаменты – по карте гравитационного поля; сейсмолинеаменты – по карте эпицентров землетрясений; термолинеаменты – по карте теплового потока.

По протяженности своих трасс линеаменты и их зоны могут подразделяться на региональные, трансрегиональные и глобальные.

В качестве исходных данных используются разномасштабные топографические карты, космоснимки и цифровые модели рельефа. Дешифрирование проводилось на спектральных и обычных космоснимках по различным изменениям фототона. Как правило, на снимках поднятия оттенены гораздо меньше, чем впадины, а эрозионная сеть на поднятиях более глубокая. Линеаменты сопоставлялись с известными разрывными нарушениями.

Анализ линеаментов помогает уточнить границы новейших поднятий и впадин, определить активность древних разрывных нарушений, выявить участки максимальной трещиноватости. По линеаментам построены розы-диаграммы, на которых показаны преобладающие направления простираний линеаментов и их количество в каждом пике, проведено сопоставление розы-диаграммы по линеаментам с розой-диаграммой по мегатрещинам. На основании анализа линеаментов были сделаны важные выводы о напряженном состоянии территории.

2.4. Метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим

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 (или структурно-геоморфологический метод – СГ) 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.

Обоснование СГ метода базируется на следующих положениях:

1 – повсеместное развитие крутопадающих плоскостей разломов в осадочном чехле платформ, которые могли сформироваться только в поле напряжений горизонтального сдвига (при вертикальной оси сжатия или растяжения плоскости разломов должны быть наклонены под углом $45^\circ \pm \alpha$, где α – угол скалывания);

2 – в верхних частях осадочного чехла мало, а вблизи дневной поверхности практически отсутствует литостатическое давление, что должно приводить к горизонтальному положению оси сжатия;

3 – данные физического [Михайлова, 2007] и математического [Ребецкий, 1987] моделирования показывают, что в осадочном чехле над сдвигом в фундаменте образуется два максимума касательных напряжений. Основной максимум приурочен к самой нижней части чехла, далее в средней части проявлено незначительное продвижение нарушений выше, а второй максимум наблюдается у дневной поверхности (рис. 2.4.1).

Под осью сжатия понимается ось главного напряжения максимального сжатия, а под осью растяжения понимается ось главного напряжения минимального сжатия, т.е. ось максимального растяжения.

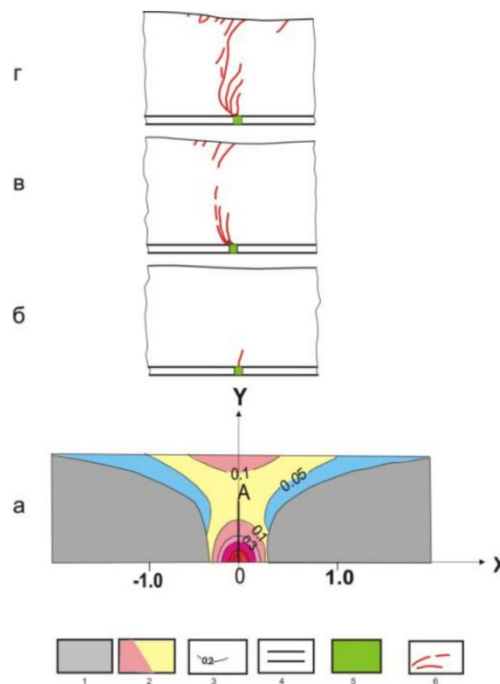


Рис. 2.4.1. Разрушение слоя над сдвигом в его основании: а – расчетные эквивалентные напряжения, ответственные за разрушение [Ребецкий, 1987]; б, в, г – последовательные стадии развития разрывов [Михайлова, 2007]: б – зарождение разрыва в слое над областью сдвига в основании; в – развитие разрывов двумя группами – снизу и сверху, г – объединение обеих групп разрывов. Условные обозначения: 1 – область двустороннего сжатия, область отсутствия разрывов; 2 – область «скалывания»: максимальные нормальные напряжения положительны, минимальные – отрицательны; 3 – изолинии

эквивалентных напряжений; 4 – блоки фундамента в основании; 5 – зона сдвига в фундаменте; 6 – разрывы (в разрезе).

Мегатрещины, образованные в сдвиговых полях напряжения, должны соответствовать ориентировке оперяющих трещин в зонах сдвигов. В методе принято четыре основных варианта взаимного расположения мегатрещин в плане, которые обобщил М.В. Гзовский [1954, 1975]. В каждом варианте выделяются две системы сопряженных сколов и система отрывов, параллельная оси сжатия. Если мегатрещины соответствуют одному из вариантов ориентировки оперяющих трещин в зоне сдвига (рис. 2.4.2), то сдвиговая кинематика разрывного нарушения считается однозначно определённой. При этом определяются ориентировки девиаторных напряжений: оси сжатия и растяжения в горизонтальной плоскости, направление сдвига (правый, левый), помимо перечисленного в некоторых случаях представляется возможным выявить транспрессионные или транстензионные условия формирования сдвига. При соответствии ориентировок мегатрещин и линеамента одному из вариантов на палетке Гзовского считается доказанной разломная природа линеамента и мегатрещин.

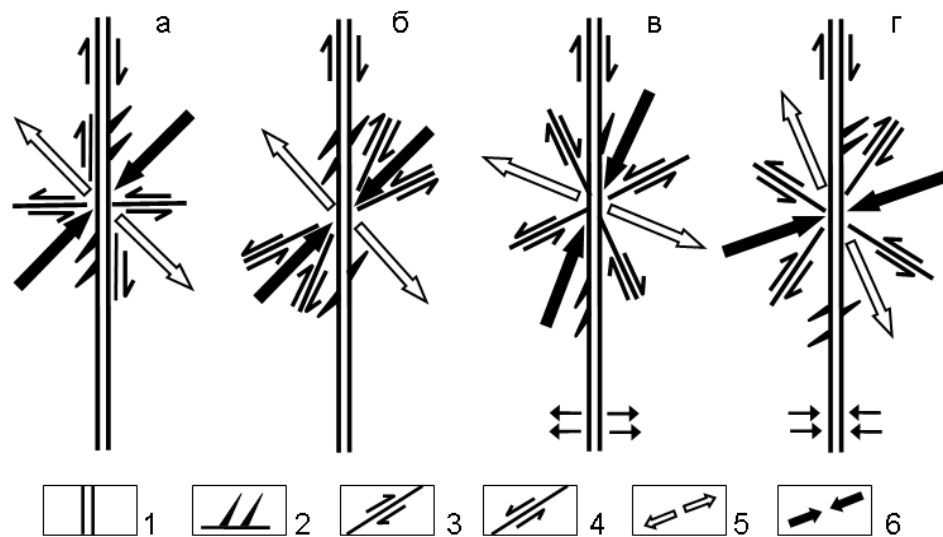


Рис. 2.4.2. Парагенезис оперяющих трещин в зоне сдвига [Гзовский, 1975]. Палетка Гзовского. Варианты напряженного состояния при углах скалывания 45° (а), $<45^\circ$ (б), обстановки дополнительного растяжения (в) и сжатия (г). 1 - разлом; 2 - трещина отрыва; 3, 4 - сколы с правой (3) и левой (4) сдвиговой кинематикой; 5, 6 - ориентация осей растяжения (5) и сжатия (6) в горизонтальной плоскости.

Исходными данными для работы метода являются разномасштабные топографические карты, космические снимки, цифровые модели рельефа, данные о

разрывных нарушениях, линеаментный анализ, различные геофизические поля (магнитное, гравитационное для анализа разрывов). Далее выделяются мегатрещины вдоль дешифрированных или известных разрывов. Ниже представлен пример работы с СГ методом вручную (рис. 2.4.3).

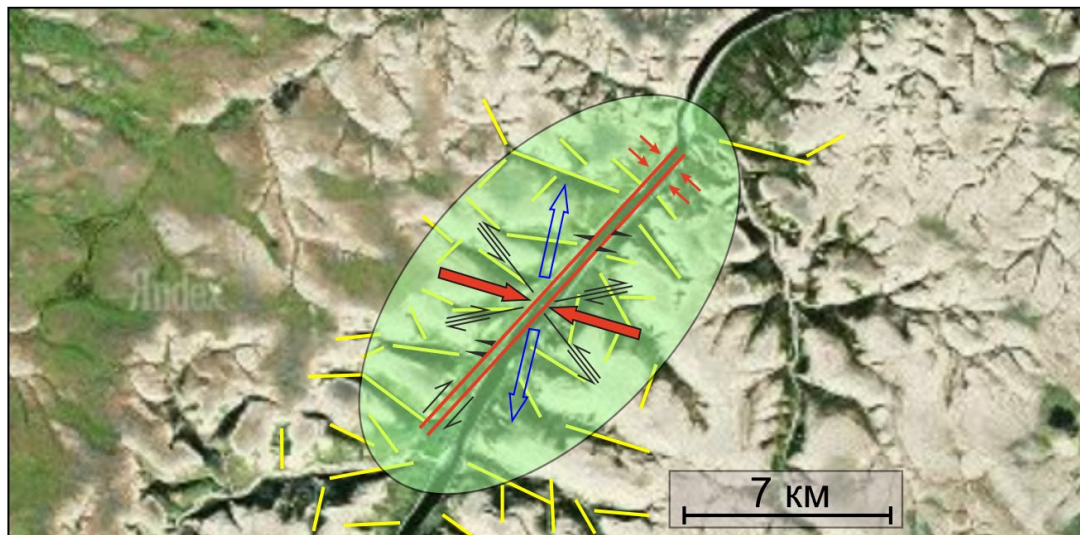


Рис. 2.4.3. Обработка СГ методом ручным способом. В зелёном овале вставка палетки М.В. Гзовского (тип «г» – сдвиг в условиях дополнительного сжатия). Желтые линеаменты – мегатрещины.

Результатом применения метода являются схемы неотектонических напряжений, содержащие информацию о разрывах (их кинематика, главные оси сжатия и растяжения, геодинамические условия дополнительного сжатия или растяжения).

В следующей подглаве подробно описывается процесс дешифрирования и в сжатой форме повторно объясняются главные детали и положения метода.

2.5. Программа SimSGM

Автоматизация геодинамических реконструкций. 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; 2011a].

Для использования СГ метода требуется навык дешифрирования неотектонических разломов по космическим снимкам. Неотектонические разломы выделяются дистанционно или на месте; в настоящем исследовании к рассмотрению предлагается 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, например, на рис. 2.5.1 и пр.), 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 [Гордеев, Молчанов, 2018].

Причиной такой линейной организации различных форм является разнообразие по происхождению, глубине заложения, масштабу и времени проявления линейных структурных образований. К их числу прежде всего относятся разрывные дислокации земной коры разных рангов, в том числе погребенные. Это разломы планетарного значения или крупные расколы глубоких слоев земной коры. Особый интерес представляют многочисленные верхнекоровые разрывы регионального и локального значения, молодые (в том числе «живые» – линии сейсмогенных разрывов или сейсмодислокаций) и древние (отмершие) [Макарова, 2009].

Как правило, вдоль разрывных зон, особенно реактивизированных или молодых, активно развивается трещиноватость в окружающем горном объеме, образуя так называемые ослабленные зоны [Костенко, 1999].

С помощью СГ метода анализируются особенности пространственного распределения и параметры дизъюнктивно-пликативных структур района исследования и конкретизируются параметры его геодинамического режима. Статистические данные о неотектонических напряжениях восстанавливаются по взаимоотношению множественных линеаментов земной поверхности – мегатрещин. Эти элементы рельефа повсеместно развиваются на поверхности платформ и осадочных комплексов плит в виде опережающей трещиноватости в зоне динамического влияния крутопадающих разломов даже в тех случаях, когда сами разломы еще не вышли на поверхности. Они развиваются в условиях горизонтальной ориентации осей сжатия и растяжения, что подкреплено результатами математического [Ребецкий, 1987] и физического [Михайлова, 2007] моделирования сдвигов платформ. Мегатрещины в области реактивизированного или новейшего (в данном контексте четвертичного заложения) разлома проявляются в виде закономерно ориентированных систем вторичных нарушений на дневной поверхности, ориентация которых в зонах динамического влияния сдвигов проанализирована и обобщена М.В. Гзовским [1954, 1975] (см. рис. 2.4.2). Иллюстрация наглядно показывает основные типы напряженного состояния. Важную роль играет количество мегатрещин определенного типа взаимного расположения (см. рис. 2.4.2), так как в природе проявляются мегатрещины всех типов вокруг каждого разлома. Это связано с неоднородностями в объемах горных пород и постоянным перемещением масс пород друг

относительно друга (что приводит к изменениям элементов рельефа и напряженного состояния) [Сим, Гордеев, 2018; 2019; Молчанов, Гордеев, 2018, 2019a].

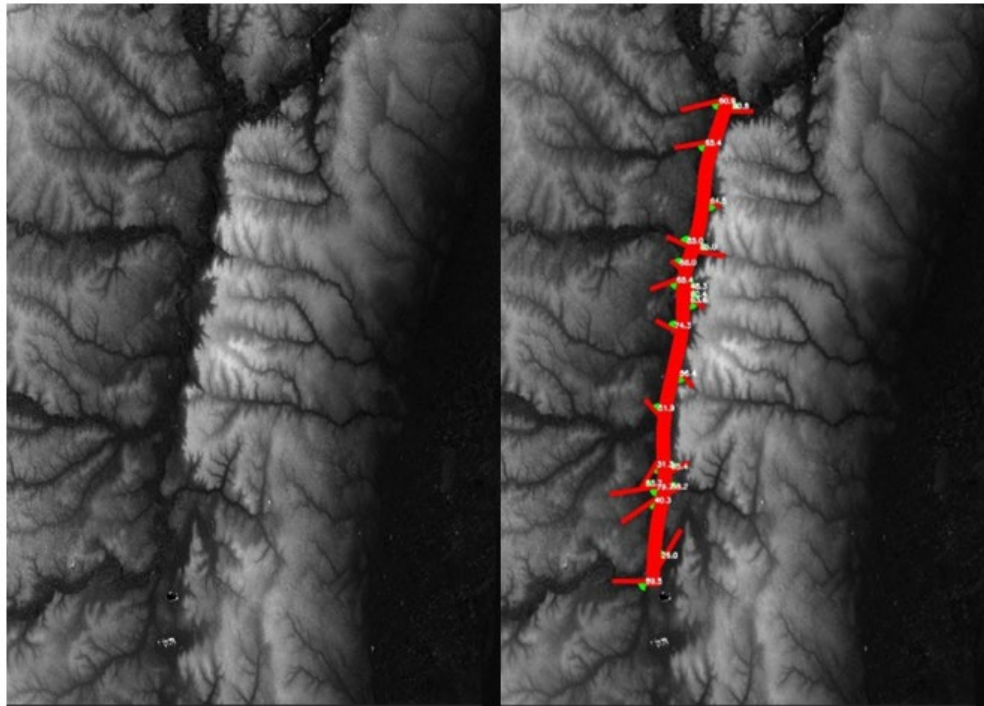


Рис. 2.5.1. Пример дешифрирования линеамента (разлома). В данном случае по глубоко-врезанной долине реки с многочисленными притоками. Мелкими штрихами обозначены мегатрещины. Выделен разлом №14 (табл. №1).

Критерием определения ориентации осей главных нормальных напряжений является нахождение двух систем сопряженных сколов, сопровождаемых системой отрывов, которая параллельна оси максимального сжатия. Технология метода заключается в дешифрировании космо-снимков высокого разрешения, выделении максимального количества мелких прямолинейных элементов рельефа вблизи выделенного более крупного линеамента. Если в процессе обработки систем мегатещин устанавливается существование определенной их системы взаимной ориентации, то такой крупный линеамент определяется как проявление на поверхности скрытого неотектонического разлома [Молчанов, Гордеев, 2019].

В том случае, когда максимальное количество выделенных мегатрещин соответствуют одному из вариантов палетки Гзовского (см. рис. 2.4.2), то принимается, что разлом/линеамент имеет тектоническую природу.

Таким образом получают данные об ориентации главных осей наибольшего растяжения и сжатия девиатора напряжений в горизонтальной плоскости и направление сдвига (правый, левый). В некоторых случаях возможно определение дополнительных

геодинамических обстановок формирования разлома, когда статистика взаимного расположения мегатрещин соответствует типам «в» и «г» на палетке Гзовского.

Необходимо помнить, что по возрасту реконструируемые тектонические напряжения преимущественно являются новейшими, так как выделяемые разломы и мегатрещины выражены в рельефе и нарушают новейшие отложения [Гордеев, Молчанов, 2018a].

Обзор существующих программных пакетов

Программный пакет реализован на языке программирования Python для целевой платформы Windows с разрядностью 64 бита.

Основой решения задачи автоматизации СГ метода Л.А. Сим является анализ линеаментов на космоснимках рельефа, топокартах и пр. На настоящий момент известны по крайней мере два программных пакета, в которых реализован линеаментный анализ с целью выявления неотектонических напряжений: LESSA [Zlatopolsky, 1992] и LINDA [Masoud, 2017]. В обоих пакетах для выделения линеаментов используются карты направлений (headingmaps, shaded relief), представляющие полутоновые изображения рельефа, освещённого с разных направлений, без отбрасываемых теней. Следует отметить, что если в пакете LESSA есть возможность преобразовать полутоновое изображение карты высот или цифровую модель рельефа (ЦМР) в карту направлений, то в пакете LINDA такой возможности нет, карта направлений должна быть подготовлена заранее. Кроме того, в пакете LESSA реализована возможность поиска линеаментов на полутоновом снимке со спутника. Хотя, как показывает автор пакета, данный вид входных данных уступает ЦМР по ряду признаков [Zlatopolsky, 2008].

В названных программных пакетах дешифрирование линеаментов производится путём нахождения границ между тёмными и светлыми областями изображения. Поскольку на картах направлений данные области обозначают смежные склоны рельефа, границы между ними оказываются хребтами или долинами. Следующим этапом после нахождения линеаментов в данных программах является их статистический анализ [Молчанов, Гордеев, 2019; Гордеев, Молчанов, 2019].

Описание программного пакета

Порядок работы программы представляется тремя основными этапами: 1) загрузка и предварительная обработка данных, 2) дешифрирование линеаментов и 3) линеаментный анализ с классификацией по М.В. Гзовскому [Гзовский, 1975]. При этом реализованы два режима работы программы: полуавтоматический, когда дешифрирование выполняется оператором вручную, и автоматический, когда все этапы работы выполняются программными алгоритмами.

Предлагаемый в настоящей работе способ автоматизации СГ метода Л.А. Сим отличается от описанных выше способов тем, что производит анализ и классификацию разломов по конкретным областям карт, принимая во внимание линеаменты определённых типов, т.е. имеет место районирование линеаментов. Данный способ состоит из трёх этапов: на первом этапе производится дешифрирование необходимых линеаментов, на втором – поиск и измерение углов между соприкасающимися линеаментами, на третьем – классификация по М.В. Гзовскому.

Выделение линеаментов может быть выполнено как вручную (путём нанесения векторных фигур на участок спутникового снимка или наложения готовой схемы), так и автоматически при помощи алгоритма скелетизации карты высот.

Этот алгоритм является оригинальным и полностью отличается от процедуры поиска линеаментов в известных программных пакетах. Используемая функция скелетизации реализована в библиотеке SciKit-Image. Суть алгоритма состоит в «истончении» (thinning) белых участков бинарного изображения. Данная процедура применяется к инвертированной карте высот, обработанной адаптивным пороговым фильтром. В результате получается бинарное изображение, содержащее линии толщиной в 1 пиксель, отображающее структуру «вогнутых» линеаментов на исследуемом участке карты (рис. 2.5.2).

Данный алгоритм имеет ряд преимуществ. Во-первых, для его работы не требуется карта направлений. Во-вторых, что наиболее важно для перехода к этапу классификации, линии на результирующем изображении не теряют связей друг с другом, что часто происходит при детектировании границ. В третьих, отбираются наиболее проявленные элементы рельефа, такие как притоки, овраги и др. [Молчанов, Гордеев, 2019; Гордеев, Молчанов, 2019].



Рис. 2.5.2. Этапы обработки карты высот: а) исходное изображение, б) бинаризация (а) при помощи адаптивного порогового фильтра, в) скелетизованное изображение по (б).

На следующем этапе применяется процедура поиска т.н. особых точек на скелетизованном изображении или нанесённой вручную векторной маске. Особые точки в данном случае представляют собой концы линий или их пересечения и находятся при

помощи известного алгоритма Shi–Tomasi, реализованного в библиотеке OpenCV. Линия разлома может быть восстановлена как сплайн, построенный на точках пересечений (Y-точках), либо при помощи построения так называемого «активного контура» [Kass, 1988], реализованного в библиотеке Sci-kitImage, когда между указанными концами разлома прокладывается сплайн, «тяготеющий» к руслу или долине, т.е. тёмным участкам карты высот. Прилегающие линеаменты строятся по концам линий скелетизованного изображения. Для того, чтобы исключить из обработки линеаменты, выходящие за пределы области динамического влияния, пользователь имеет возможность нарисовать маску.

Далее в точках пересечения прилегающих линеаментов и линии разлома производится измерение углов. Для этого сравнивается яркость пикселей на окружностях с центром в особой точке и радиусом, подбираемым так, чтобы шаг измерения не превышал заданной погрешности. Точки-вершины развёрнутых углов отбрасываются, а значения острых углов записываются в массив для последующей классификации по Гзовскому.

Этап классификации реализован в виде цепи условий, проверяемых для каждого значения углов из полученного массива. Условия состоят в принадлежности угла заданному интервалу, с фиксированным средним и изменяемым допустимым разбросом. Каждый тип имеет разный набор условий. После проверки всех условий для всех найденных значений углов вычисляются вероятности принадлежности разлома к тому или иному типу.

В полуавтоматическом режиме на вход программе подаётся спутниковый снимок, либо карта высот, либо уже готовая векторная схема линеаментов в формате SVG. После ручного нанесения на спутниковый снимок или карту высот дешифрованных линеаментов (мегатрещин, отрывов, а также линий, соответствующих разломным структурам) производится их анализ и классификация в реальном времени с интерактивным подбором окна, скользящего по линиям разломов. При интерактивном анализе в каждый момент времени отображаются результирующие оси напряжений, вероятность принадлежности к тому или иному типу и роза-диаграмма распределения линеаментов в окне анализа.

Для работы в автоматическом режиме в программу может быть загружена карта высот или спутниковый снимок. Линия разлома восстанавливается при помощи построения так называемого «активного контура» [Kass, 1988], реализованного в библиотеке Sci-kit Image, когда между указанными концами разлома прокладывается

сплайн, «тяготеющий» к тёмным участкам карты высот или карты когерентности (см. далее).

Ключевой идеей автоматического дешифрирования линеаментов является применение алгоритмов компьютерного зрения к бинаризованному изображению загруженных данных. Если в качестве исходных данных используется карта высот, бинаризация производится следующим образом: вначале к изображению применяется гауссов фильтр с размером окна, не превышающим минимальный характерный размер дешифрируемых линеаментов; далее производится обработка адаптивным пороговым фильтром с настраиваемым размером блока; затем выполняется процедура скелетизации, которая состоит в истончении белых участков бинаризованного изображения до линий толщиной в один пиксель. При анализе спутникового снимка его изображение сначала переводится в одноканальное представление оттенками серого, после чего для полученного изображения рассчитывается карта когерентности по одному из трёх методов на выбор пользователя: первые два метода, предложенные в работах [Marfurt, 1998] и [Gersztenkorn, 1999], получают значение когерентности для каждого пикселя, вычисляя корреляционные функции для строк и столбцов в скользящем окне заданного размера, при этом первый проявляет чувствительность к глобальному значению яркости пикселей, в то время как второй – к локальным изменениям внутри окна; третий метод основан на вычислении в каждой точке градиентного структурного тензора (GST) и взятии в качестве величины когерентности отношения разности и суммы его собственных значений [Randen, 2000]. Следует отметить, что первые два метода являются наиболее точными, но при этом весьма ресурсоёмкими даже для небольших изображений; третий метод, напротив, оказывается крайне производительным, но предоставляет более грубый результат. Далее к полученной карте применяется процедура, аналогичная описанной выше для карты высот. К скелетизованному изображению может быть применена маска, ограничивающая область динамического влияния; эта маска строится на основе гауссова размытия линии разлома на заданную пользователем величину.

Последующее автоматическое дешифрирование линеаментов может быть произведено четырьмя разными алгоритмами на выбор пользователя. Первый алгоритм заключается в поиске так называемых особых точек, который описан выше. Основой второго алгоритма является преобразование Хафа, которое переводит скелетизованное изображение в пространство параметров (наклон, длина вектора нормали к прямой), затем при помощи вероятностных оценок осуществляется выделение линейных элементов. Третий алгоритм называется “Line segment detector” [von Gioi, 2012], он осуществляет поиск прямых отрезков путём построения карты изолиний градиента в скользящем окне;

это позволяет выделить пиксели с одинаковым направлением изолиний и объединить их в линеамент. Четвёртый алгоритм основан на поиске отдельных (незамкнутых) контуров на скелетизованном изображении по методу, предложенному в работе [Suzuki, 1985]; вокруг каждого найденного контура строится описанный прямоугольник наименьшей площади и вычисляются координаты середин наиболее удалённых сторон. При этом, данный алгоритм позволяет оценить не только длину и ориентацию линеамента, но также и его кривизну (по соотношению сторон прямоугольника), это свойство используется для разделения линеаментов на мегатрещины и отрывы.

Результат работы программы может быть сохранён пользователем в текстовый файл во внутреннем формате, в который записываются координаты всех линеаментов, позиции отмеченных осей напряжений и типы разломов по М.В. Гзовскому с полученными вероятностями.

Фильтрация ложных линеаментов, возникающих при применении автоматических алгоритмов дешифрирования к спутниковым снимкам территорий, содержащих большое количество техногенных объектов.

Если исследуемая территория характеризуется достаточно пологим рельефом, и признаки линеаментов, используемых в СГ методе, крайне недостоверно различаются на картах высот. Поэтому анализ проводится с опорой на спутниковые снимки.

В свою очередь, на находящихся в свободном доступе спутниковых снимках часто присутствуют артефакты склейки изображений, сделанных в разное время. Также на некоторых территориях встречается большое число дорог и сельскохозяйственных угодий с чётко очерченными границами, в то время как линейные элементы естественного происхождения выделяются очень слабо. Названные обстоятельства не позволяют применять алгоритмы автоматического дешифрирования линеаментов в данном регионе. Поэтому были найдены и реализованы способы предварительной обработки изображения и фильтрации ложных линеаментов для того, чтобы полная автоматизация СГ метода на подобных территориях стала возможной.

При бинаризации карт территорий с пологим рельефом оказалось, что применение описанной процедуры хотя и позволяет выделить низкоконтрастные линеаменты, но нарушает их непрерывность в местах, где характерная толщина линеамента становится меньше размера окна анализа. Кроме того, мелкие детали полностью пропадают с изображения по той же причине. Поэтому в настоящей работе предлагается рассмотреть другой метод предварительной обработки одноканального изображения спутникового снимка, основанный на вычислении градиентов по двум ортогональным направлениям и их евклидовой нормировке. Данное преобразование выражается следующей формулой:

$$R = \sqrt{(\nabla_x M)^2 + (\nabla_y M)^2},$$

где M – исходное монохромное (одноканальное) изображение, R – результат преобразования. Такое преобразование позволяет гораздо лучше выделить линеаменты и прочие неоднородности, нежели расчёт карты когерентности (рис. 2.5.3) [Молчанов, 2019], кроме того, оно вычисляется значительно быстрее, чем карта когерентности. После данного преобразования изображение подвергается адаптивному пороговому фильтру и скелетизации.



Рис. 2.5.3. Сравнение карты когерентности (слева) с результатом градиентного преобразования (справа).

Последующее автоматическое дешифрирование линеаментов может быть произведено четырьмя разными алгоритмами на выбор пользователя. Три из них осуществляют поиск прямых отрезков, в то время как четвёртый позволяет выделять незамкнутые контуры сложной формы по методу, предложенному в работе [Suzuki, 1985]. Этот алгоритм и предлагается использовать для последующей фильтрации ложных линеаментов [Молчанов, Гордеев, 2020].

Полученные контуры аппроксимируются ломаными линиями, что позволяет детально описывать их форму. Ложные линеаменты, вызванные приведёнными особенностями, характеризуются тем, что все они представляют собой линии с близкой к нулю кривизной, либо с постоянной кривизной в местах поворотов дорог. Линеаменты естественного происхождения, напротив, имеют быстро меняющуюся кривизну по всей своей длине. Это обстоятельство позволяет сформулировать критерий фильтрации ложных линеаментов: дисперсия их локальных кривизн не должна превышать заданный порог. Подбор порогового значения может производиться в интерактивном режиме. Для реализации данного критерия предлагается следующий алгоритм: 1) из всех найденных контуров выбрать те, у которых три и более вершин; 2) для каждой последовательной

тройки вершин вычислить кривизну проведенной через них окружности (локальную кривизну); 3) вычислить стандартное отклонение локальных кривизн и сравнить его с пороговым значением. Результат работы алгоритма в программе SimSGM показан на рис. 2.5.4. Пороговое значение разброса кривизн было подобрано вручную, исходя из условия недопущения фильтрации искомых естественных линейментов [Гордеев, Молчанов, 2020].

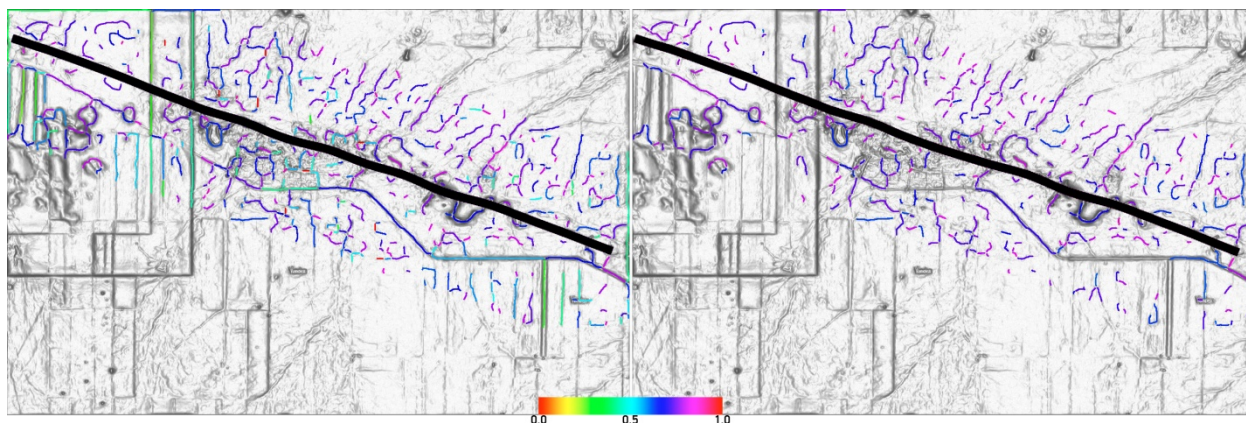


Рис. 2.5.4. Фильтрация ложных линейментов в области динамического влияния разлома. Слева: без фильтрации; справа: фильтрация с пороговым значением 0,6. Цветом показана величина разброса локальных кривизн каждого линеймента.

На начало 2019 года программа имела графический интерфейс (рис. 2.5.5).

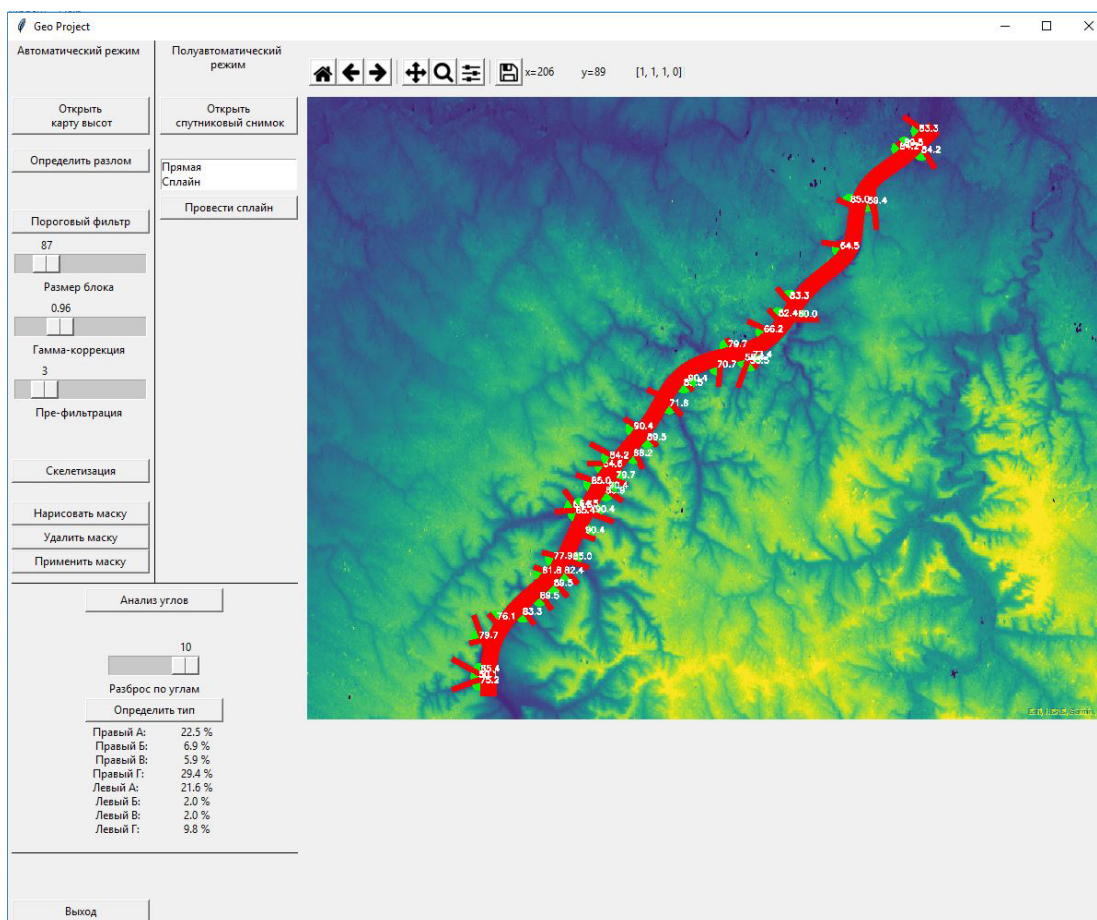


Рис. 2.5.5. Старый интерфейс программы (v. 09.2018).

На (рис. 2.5.6) показан актуальный интерфейс программы, позволяющий производить выше описанные манипуляции.

Перейдём к тестам программы на реальных участках местности с уже известными по геоданным направлениями разломов и сравним результаты с классификацией, проведённой ранее вручную в рамках СГ метода Л.А. Сим.

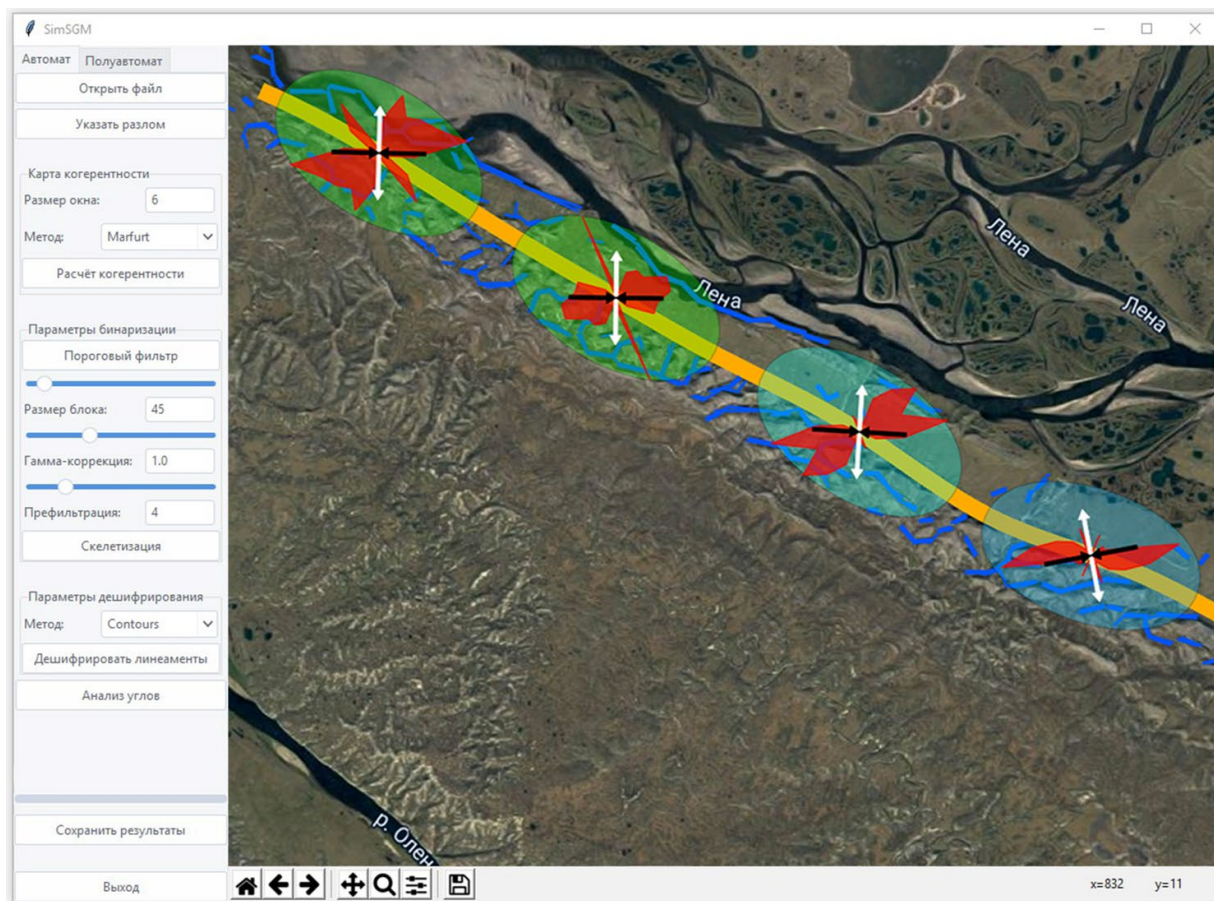


Рис. 2.5.6. – Интерфейс программы (v. 09.2019).

Тестирование программы

Для тестирования был выбран регион Лено-Оленёкского междуречья (рис. 2.5.7). Территория тестирования приурочена к северо-востоку Сибирской платформы. Исследование геодинамики, проведённое ранее вручную, показало, что основная масса разрывных структур развивается в обстановке дополнительного сжатия (тип «Г», см. рис. 9). Обстановка дополнительного растяжения (тип «В») мало распространена в новейших впадинах. Территория имеет северную и южную области неотектонически активных структур. Основными источниками конструирования структурного плана территории являются новейшее Оленекское поднятие и Верхоянский хребет для севера и юга соответственно.

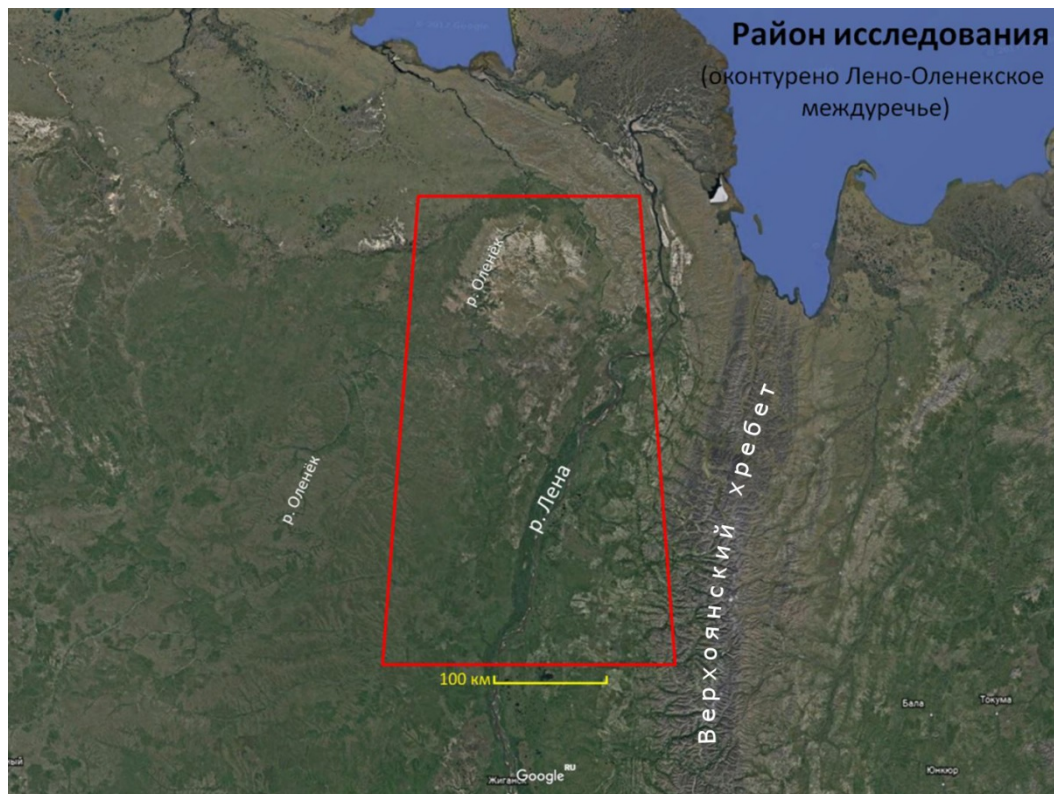


Рис. 2.5.7. Район тестирования ПО с космического снимка.

Карты высот для этого региона были взяты из данных ASTERGlobalDEMv2. Тестирование программы проводилось как в автоматическом режиме, так и в полуавтоматическом, когда на первом этапе вручную наносится векторная маска линеаментов на спутниковое изображение местности. Также, для проведения исследований были выбраны только главные разломы в этом регионе. Допустимый разброс классификации выбирался из соображений минимизации количества углов, не соответствующих ни одному типу (при малых значениях разброса), и количества углов, соответствующих сразу двум типам (при больших значениях). В автоматическом режиме линии всех разломов строились методом активного контура. Результаты тестирования представлены в таблице №1, а тестируемые разрывные структуры, сделанные классическим способом (вручную) (рис. 2.5.8):

Таблица №1

№ разл ома	Режим тестирова ния	Вероятность типа, %								Допуст имый разбро с, °	Тип по извест ным данны м
		A-L	Б-L	В-L	Г-L	A-R	Б-R	В-R	Г-R		
1	авто	21,6	2,0	2,0	9,8	22,5	6,9	5,9	29,4	10	Г-R
2	авто	13,0	8,7	8,7	17,4	13,0	4,3	4,3	30,4	5	Г-R
3	полуавто	25,0	20,5	9,1	4,5	22,7	9,1	0	9,1	8	A-R
4	полуавто	5,4	2,7	0	16,2	21,6	32,4	13,5	8,1	7	Г-L
5	полуавто	12,9	22,6	16,1	16,1	6,5	6,5	6,5	12,9	10	Б-L
6	авто	6,2	10,0	11,2	11,2	6,2	8,8	10,0	36,2	6	Г-L
7	авто	30,0	6,7	6,7	13,3	30,0	0	3,3	10,0	10	Г-L
7	полуавто	31,6	5,3	2,6	15,8	25,5	2,6	2,6	10,5	6	Г-L
8	авто	32,7	8,2	6,1	8,2	30,0	0	2,0	12,2	8	Г-L
9	полуавто	16,7	8,3	2,8	11,1	8,3	8,3	8,3	36,1	7	Г-L
10	авто	20,7	20,7	10,3	13,8	13,8	6,9	13,8	0	8	Г-L
10	полуавто	12,9	29,0	19,4	12,9	7,5	2,5	7,5	17,5	6	Г-L
11	авто	17,6	0	14,7	0	20,6	17,6	14,7	14,7	7	A-R
12	авто	5,3	5,3	7,9	15,8	2,6	18,4	21,1	23,7	8	Г-R
13	полуавто	17,6	0	0	17,6	23,5	23,5	17,6	0	6	A-R
14	авто	5,3	7,9	13,2	10,5	10,5	15,8	10,5	26,3	5	Г-R
15	авто	15,9	13,6	11,4	25,0	11,4	2,4	9,1	11,4	5	Г-L
16	авто	26,9	19,2	7,7	7,7	15,4	3,8	3,8	15,4	6	Г-L
17	авто	19,0	2,5	2,5	10,1	20,3	7,6	6,3	31,6	9	Г-R
18	авто	25,0	2,3	2,3	9,1	34,1	18,2	6,8	2,3	8	A-R
19	авто	8,2	6,2	5,2	11,3	7,2	11,3	9,3	41,2	6	Г-R
20	полуавто	16,7	11,1	11,1	33,3	16,7	0	0	11,1	6	Г-L
21	авто	15,8	7,9	5,3	10,5	18,4	10,5	5,3	26,3	8	Г-R
22	авто	30,0	15,0	10,0	5,0	22,5	2,5	2,5	12,5	8	Г-L
23	авто	21,7	7,2	7,2	8,7	21,7	7,2	7,2	18,8	6	A-L
24	авто	5,3	1,8	1,8	17,5	5,3	12,3	12,3	43,9	7	Г-R
25	авто	23,3	0	3,3	13,3	23,3	13,3	13,3	10,0	6	A-R
25	полуавто	18,2	0	0	14,5	21,8	14,5	10,9	20,0	6	A-R

Цветом показаны: болотно-зелёным положительный результат теста (совпадение машинного и ручного определений локального стресс-состояния); бледно-оранжевым отрицательный тест (не совпадение ручного и машинного определений локального стресс-состояния); лиловым не совпадение результатов определения локального стресс-состояния ручного с машинным.

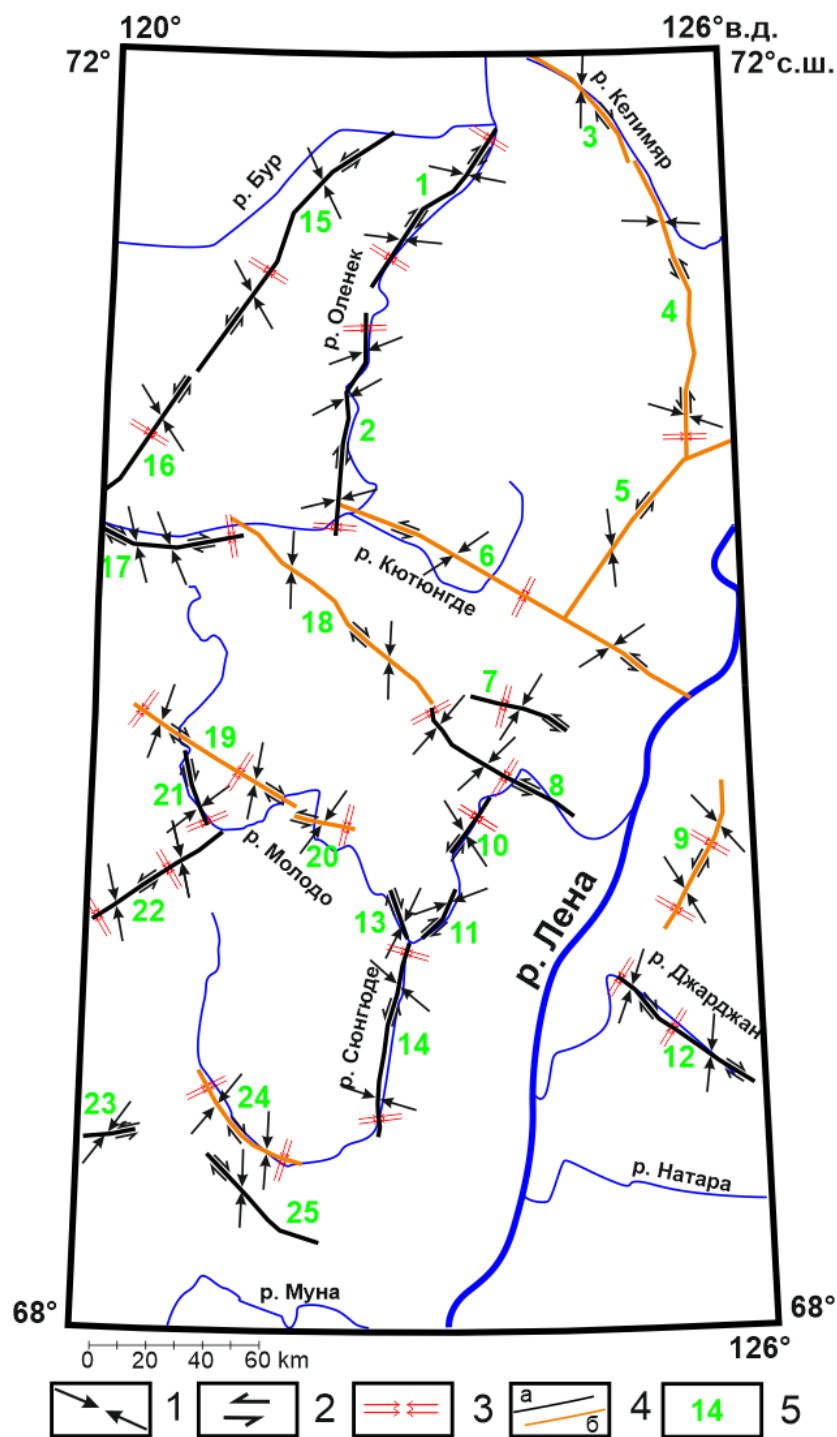


Рис. 2.5.8. Схема неотектонических напряжений и геодинамики северо-восточной окраины Восточно-Сибирской платформы. 1 – оси сжатия в горизонтальной плоскости, восстановленные СГ; 2 – направления сдвигов; 3 – локальные геодинамические обстановки сжатия; 4 – а) дешифрованные линеаменты, б) разломы по геологическим данным; 5 – номера тестируемых разрывных структур, соответствующих таблице №1.

Тестирование проводилось на территории Лено-Оленекского междуречья. Местность обусловлена контрастным рельефом:

- 1) Малоамплитудный рельеф дельты р. Лена с превышением первые метры;
- 2) Плоскогорный рельеф Оленекского поднятия с превышением до 600 м;
- 3) Горный рельеф северного окончания Верхоянского хребта с превышением до 1000 м.

Большую проблему в обработке накладывает малая информативность современных источников, откуда можно взять данные о форме рельефа. Топографическая съемка проводилась более 60 лет назад. А мировая SRTM съемка имеет большое количество артефактов (рис. 2.5.9). В представленной версии программного пакета подобная проблема решается использованием спутниковых снимков [Молчанов, Гордеев, 2018].

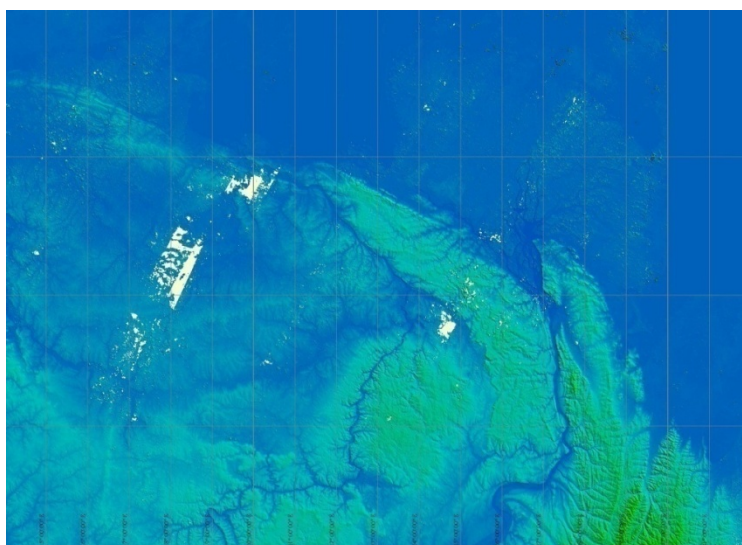


Рис. 2.5.9. Пример типичного изображения для северных регионов. Белые прерывистые пятна – артефакты съемки, где нет данных.

Восстановленные локальные стресс состояния ручным методом (рис. 2.5.10) на 85% совпадают с программной обработкой (рис. 2.5.11). Несовпадение результатов, как правило, обусловлено скелетизацией с «перекрещиванием», когда элементы скелета накладываются, пересекают друг друга, имеют дугообразные изгибы. Это происходит в случае, если начальное изображение обладает настолько размытыми или пересекающимися градиентами (размытый снимок; очень пологий рельеф; техногенный рельеф), что невозможно выправить фильтрами [Гордеев, Молчанов, 2019]. А вторая причина несовпадения может быть связана с особенностью человеческого восприятия, то есть человек может упустить детали рельефа или наоборот увидеть больше в то время, как программа учитывает все выделенные группы мегатрещин и вычисляет статистически принадлежность разрывной структуры к тому или иному типу [Гордеев, 2020].

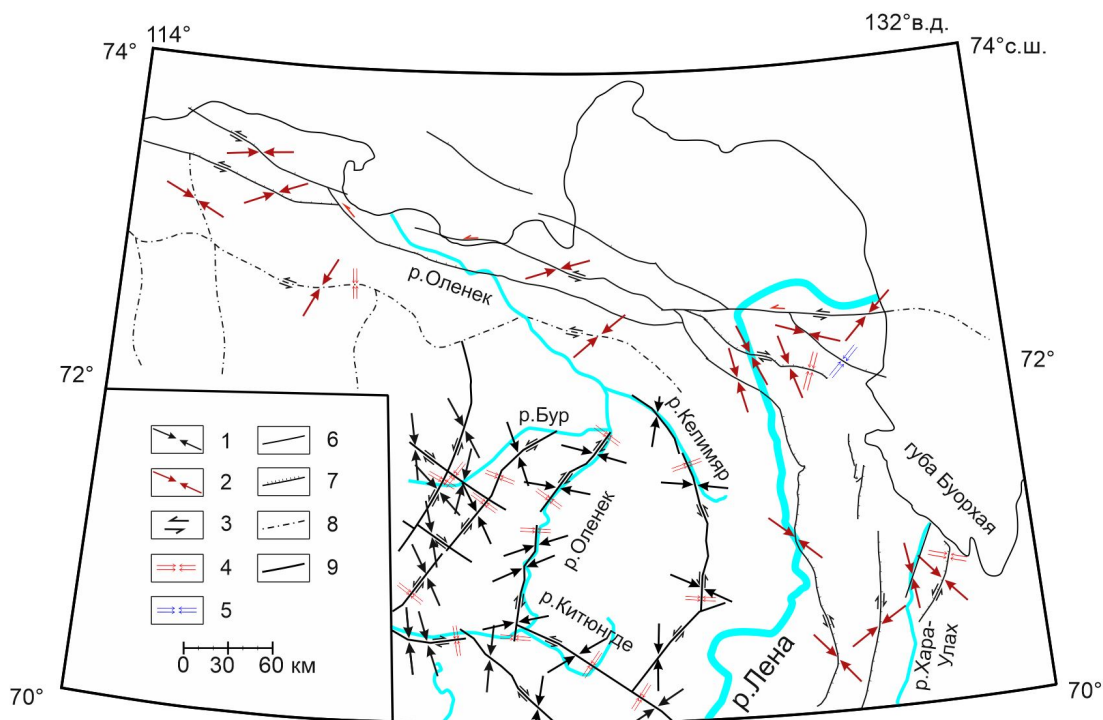


Рис. 2.5.10. Результаты обработки ручным методом реконструкции сдвиговых тектонических напряжений.

1–результаты реконструкций ручным методом [Гордеев, 2019]; 2–результаты реконструкций ручным методом [Гордеев, Молчанов, 2019]; 3–направления сдвигов; 4–условия транспрессии; 5–условия транстенсии; 6–разлом второго ранга; 7–разлом (надвиг); 8–погребенный разлом; 9–разлом первого ранга.

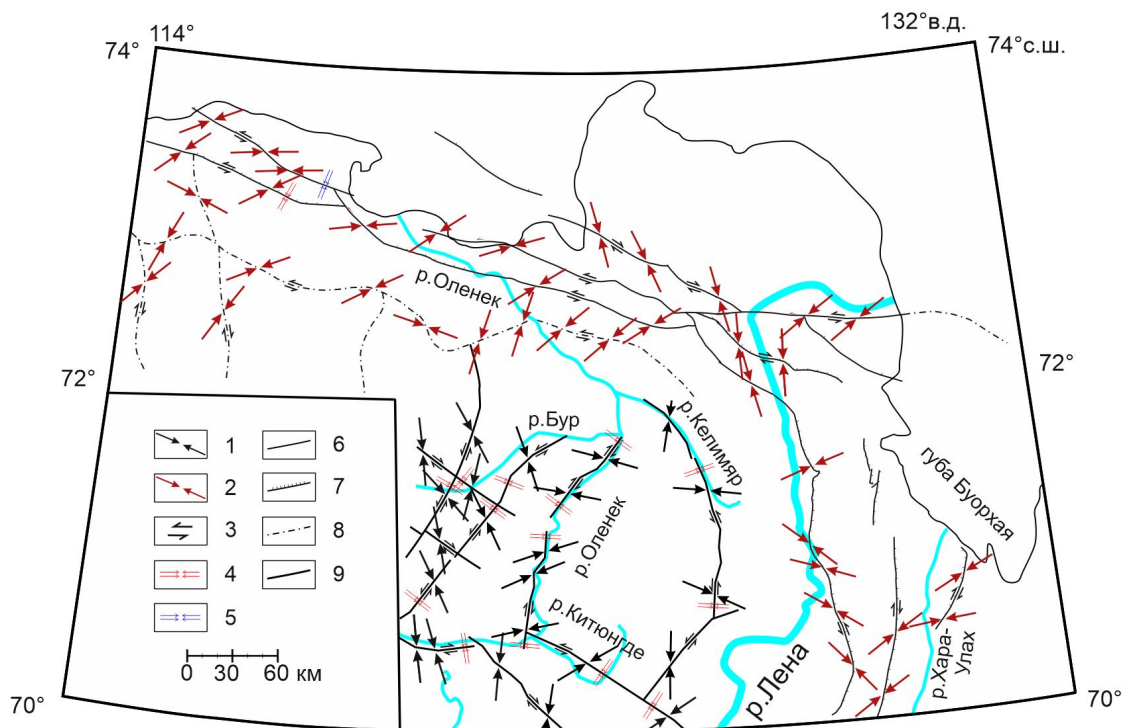


Рис. 2.5.11. Результаты обработки программой SimSGM.

1 – результаты реконструкций ручным методом [Гордеев, 2019]; 2 – результаты реконструкций программой [Гордеев, Молчанов, 2019]; 3 – направления сдвигов; 4 – условия транспрессии; 5 – условия транстенсии; 6 – разлом второго ранга; 7 – разлом (надвиг); 8 – погребенный разлом; 9 – разлом первого ранга.

Обсуждение и выводы по программному пакету

Данные результаты позволяют высказать ряд замечаний касательно работы алгоритмов, использованных в программе.

Прежде всего, отметим, что зашумлённость данных AsterGDEMv2 и наличие в них «артефактов» (см. рис. 2.5.9) (областей, где данных о высотах нет) негативно сказались на работе алгоритма скелетизации. Однако, поскольку в программе предусмотрена возможность предварительной фильтрации изображения, для большинства регионов стало возможным использование автоматического режима. Для корректной его работы пришлось увеличить радиус действия адаптивного порогового фильтра, а также медианного фильтра, используемого для сглаживания исходного изображения. В итоге уменьшилась выборка дешифрируемых линеаментов: на изображении остались только явно выраженные. Тем не менее, на результаты классификации это повлияло слабо, поскольку для всех разломов, обработанных в автоматическом режиме, за исключением №6, было правильно определено направление, и для подавляющего большинства – тип.

Возникло несколько ситуаций (разломы №№ 7, 10, 23, 25), когда направление либо тип были определены неоднозначно: указывались одинаковые значения вероятностей. Такие ситуации характерны для недостаточной выборки линеаментов. Применение полуавтоматического метода для тех же разломов (на примере 7, 10 и 25) позволило добиться однозначности. При этом оказалось, что такие разломы действительно содержат почти одинаковое количество признаков и того, и другого типа. Так что значения вероятностей в автоматическом и полуавтоматическом режимах оказываются близки, что наиболее отчётливо видно для разлома №7.

В регионах с сильно зашумлёнными или отсутствующими данными использовался полуавтоматический режим. Алгоритмы измерения углов и классификации в этом режиме полностью идентичны тем, что используются в автоматическом. Однако, результаты в полуавтоматическом режиме совпадают с известными данными примерно в половине случаев. Это может указывать на влияние человеческого фактора на проводимые исследования, когда ошибки, допущенные при построении векторной маски вручную, оказываются более существенными, чем использование несовершенных данных автоматическим алгоритмом.

В целом, проведённое тестирование следует считать успешным, поскольку большая часть исследуемых разломов была правильно классифицирована. Необходимо, тем не менее, обратить внимание на ряд аспектов программного пакета, требующих дополнительной проработки. Во-первых, необходимо улучшить или заменить медианный фильтр, поскольку, как оказалось, при больших значениях радиуса размытия на бинаризованном изображении появляются артефакты в виде «рваных краёв», что при скелетизации приводит к появлению дополнительных мелких штрихов, затрудняющих дешифрирование линеаментов. Во-вторых, следует автоматизировать построение маски области динамического влияния. В-третьих, стоит реализовать одновременную или поочерёдную обработку нескольких разломов на одной карте в одном сеансе работы программы. Есть и другие аспекты.

Следует отметить, что реализованная возможность построения карт когерентности по спутниковым снимкам позволяет применять автоматический алгоритм анализа для областей с неудовлетворительным качеством карт высот. Это особенно актуально при реконструкции неотектонических напряжений, например, в северных регионах Сибири, не попадающих в область покрытия данных SRTM [Молчанов, Гордеев, 2019; Гордеев, Молчанов, 2019].

Однако при рассмотрении использованных алгоритмов дешифрирования линеаментов остаётся ряд вопросов. Так пока нет однозначного ответа на вопрос, какой из алгоритмов даёт наиболее точные результаты в тех или иных геологических условиях; кроме того, требуются дополнительные исследования для установления критерия различия мегатрещин и отрывов в контексте алгоритма поиска контуров с определением их кривизны.

Предложенный алгоритм фильтрации позволил избавиться от всех ложных линеаментов, имеющих кривизну, близкую к нулевой. В частности, линеаменты, соответствующие артефактам склейки и границам сельскохозяйственных угодий, в приведённом примере исчезли полностью. Однако, многие участки дорог не были отфильтрованы. Это может объясняться двумя факторами. Во-первых, предложенный критерий пока учитывает только разброс локальных кривизн по ходу линеамента, но не учитывает их распределение. Во-вторых, применение на этапе предварительной обработки гауссова фильтра для удаления шумов на исходном изображении приводит к возникновению неровностей на скелетизованном изображении, поэтому изначально прямые линеаменты могут приобретать «ложную» кривизну.

Процедура фильтрации уже позволяет применять полностью автоматизированный метод на некоторых классах территорий, содержащих большое количество ложных линеаментов [Гордеев, Молчанов, 2020; Молчанов, Гордеев, 2021].

Таким образом, к настоящему моменту было создано и успешно протестировано программное средство, позволяющее автоматизировать СГ метод Л.А. Сим и значительно ускорить работы по определению неотектонических напряжений этим методом.

ГЛАВА 3. Новейшая тектоника северо-востока Сибирской платформы

Новейшая тектоника имеет заметные различия в северной и южной частях района исследований, что обусловлено особым положением крупных региональных структур (Анабарская антеклиза, Вилуйская синеклиза, Верхоянский хребет) на Сибирской платформе [Хаин, 2001].

Описание разделено на две части, в первой описаны структуры северной части, во второй южной. Новейшая структура исследуемой территории до настоящего времени не была детально изучена. На картах новейшей тектоники Н.И. Николаева [1979], А.Ф. Грачева [1996, 1997] 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.

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 результатов анализа в виде структурно-геоморфологической карты, неотектонической карты, карты циклов развития рельефа. В данной работе используется схема неотектоники, так как на ней отображаются новейшие структуры, необходимые для анализа новейших напряжений.

Данные об амплитудах вертикальных перемещений в новейший тектонический этапы взяты из работ Р.О. Галабалы, так как он являлся основным исследователем геоморфологии и неотектоники исследуемой области, согласно опубликованным данным [Галабала, 1970, 1985, 1988-1992 гг.ф.] и объяснительным запискам [ГГК, РФ, 2013; 2016].

Самая детальная работа по выявлению новейших вертикальных движений была проведена Р.О. Галабалой [1970] в масштабе 1:1 000 000 (рис. 3.1). Он выяснил, что для Оленекского поднятия характерны амплитуды вертикальных перемещений порядка 200-300-т метров. Для кряжа Чекановского около 400-т метров. Мунский свод испытывает колебания до 200-т метров. Верхоянье достигает подвижек более 1 км. В Бурской и Лено-Хатангской впадинах амплитуды вертикальных перемещений почти равны нулю.

В новейшее время произошла перестройка структурного плана. Древний Оленекский свод после продолжительного платформенного этапа, прерываемого вспышками магматизма [ГГК РФ, 2013; ГК СССР, 1965], был унаследован 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 (рис. 3.2 и 3.3). 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.

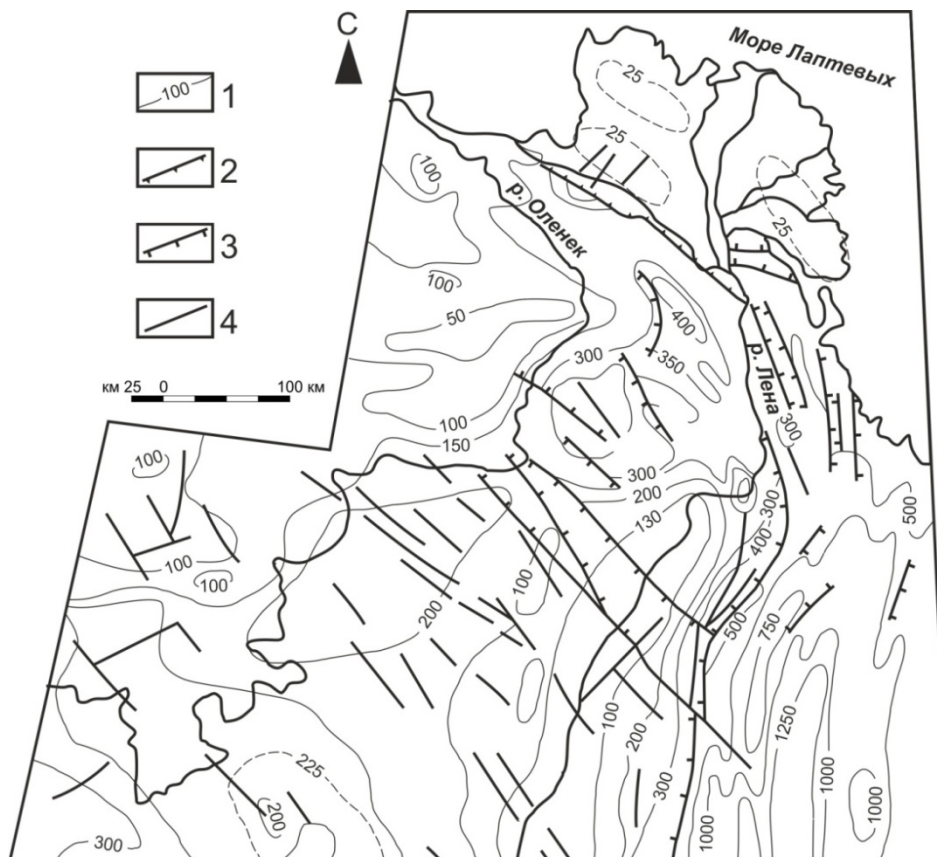


Рис. 3.1. Схема новейшей тектоники севро-восточной части Сибирской платформы и Верхоянской складчатой области [Галабала, 1970]. С упрощениями Н.А. Гордеев.

1 – изолинии суммарных амплитуд новейших движений, в метрах; 2 – флексуры; 3 – сбросы и взбросы (штрихи направлены в сторону опущенного крыла); 4 – прочие разрывные нарушения.

Ниже дана характеристика новейшей структуры исследуемой территории (см. рис. 3.2) основанная на работах, приходящихся, главным образом, на конец 20-го века [Галабала, 1970, 1985, 1988-1992ф.; Ким, 1985; Имаев, 2013, 2016, 2017]. Дана оценка масштабности работ по новейшей тектонике, так например, на картах новейшей тектоники Н.И. Николаева [1979], [Новейш. Тект., об.зап., 1998], и А.Ф. Грачева [1996] Оленёкское поднятие показано обобщенно – в виде двух структур с амплитудами поднятий 200-300 м, разделенных зоной прогиба. 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 Оленекское, 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 набирает интенсивность для всей территории исследования [Галабала, 1985]. В среднечетвертичное время снова отмечен этап выравнивания территории, который недолго продлился из-за распространения Сартанского оледенения [Галабала, 1970].

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

Непосредственным предметом изучения является центральная часть территории исследования – Лено-Оленекское междуречье (этой части уделяется основное внимание в работе). Для того чтобы понять, в каких условиях развивается Лено-Оленекское междуречье в работу добавлены данные по западной (с 113° по 120° восточной долготы) и восточной части (с 132° по 126° восточной долготы). Западная и восточная области являются обзорными и подробному анализу не подвергались.

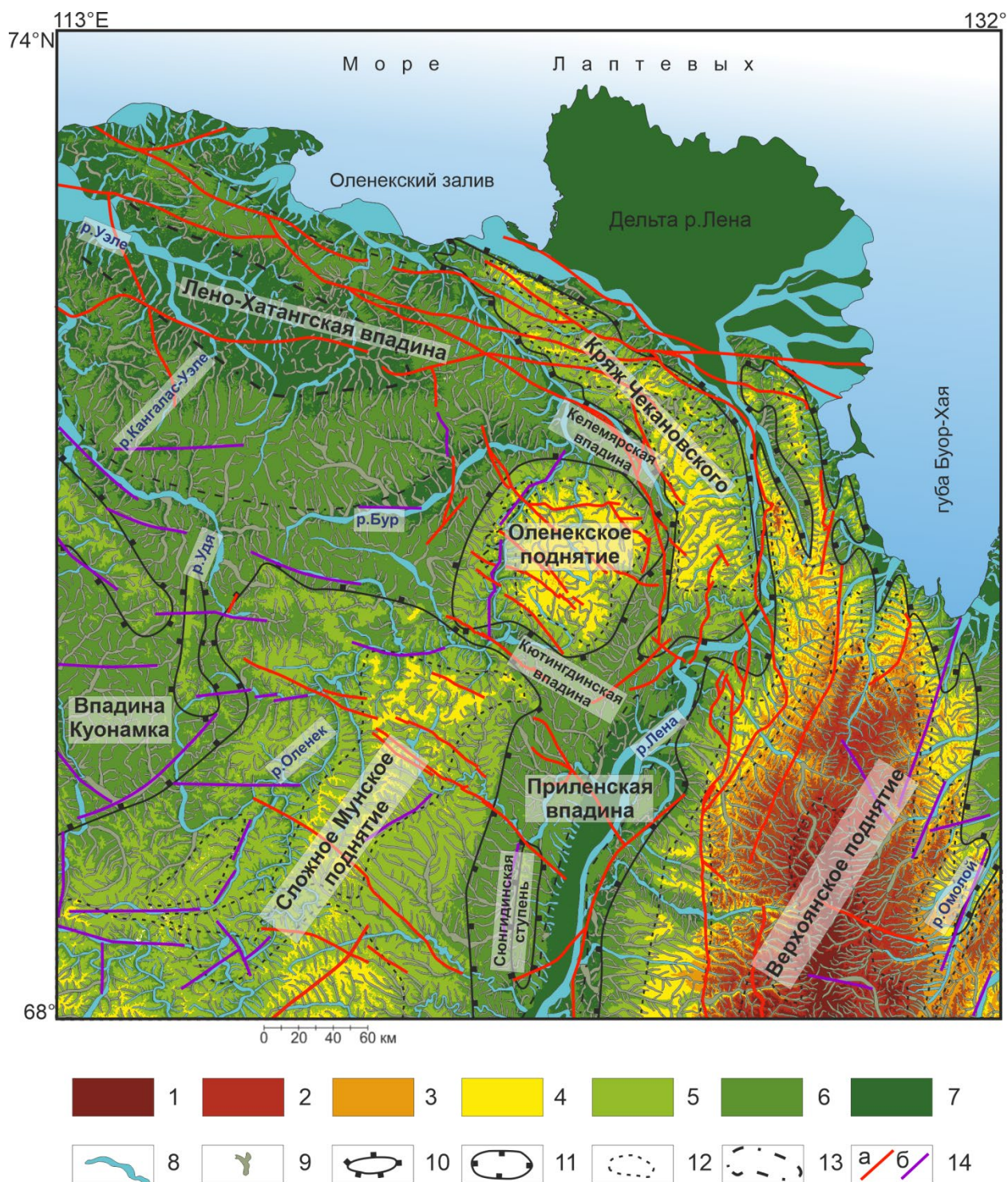


Рис. 3.2. Схема новейшей тектоники Лено-Оленекского междуречья и структур его обрамления. Составили Н.А. Гордеев, Л.А. Сим.

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 [ГГК, R-(50)-52, 1975; ГГК, S-50, S-51, S-52, 2011; ГГК, R-51, 2013; ГГК, R-52, 2015], б – линеаменты с разрывной кинематикой (новейшие ослабленные зоны).

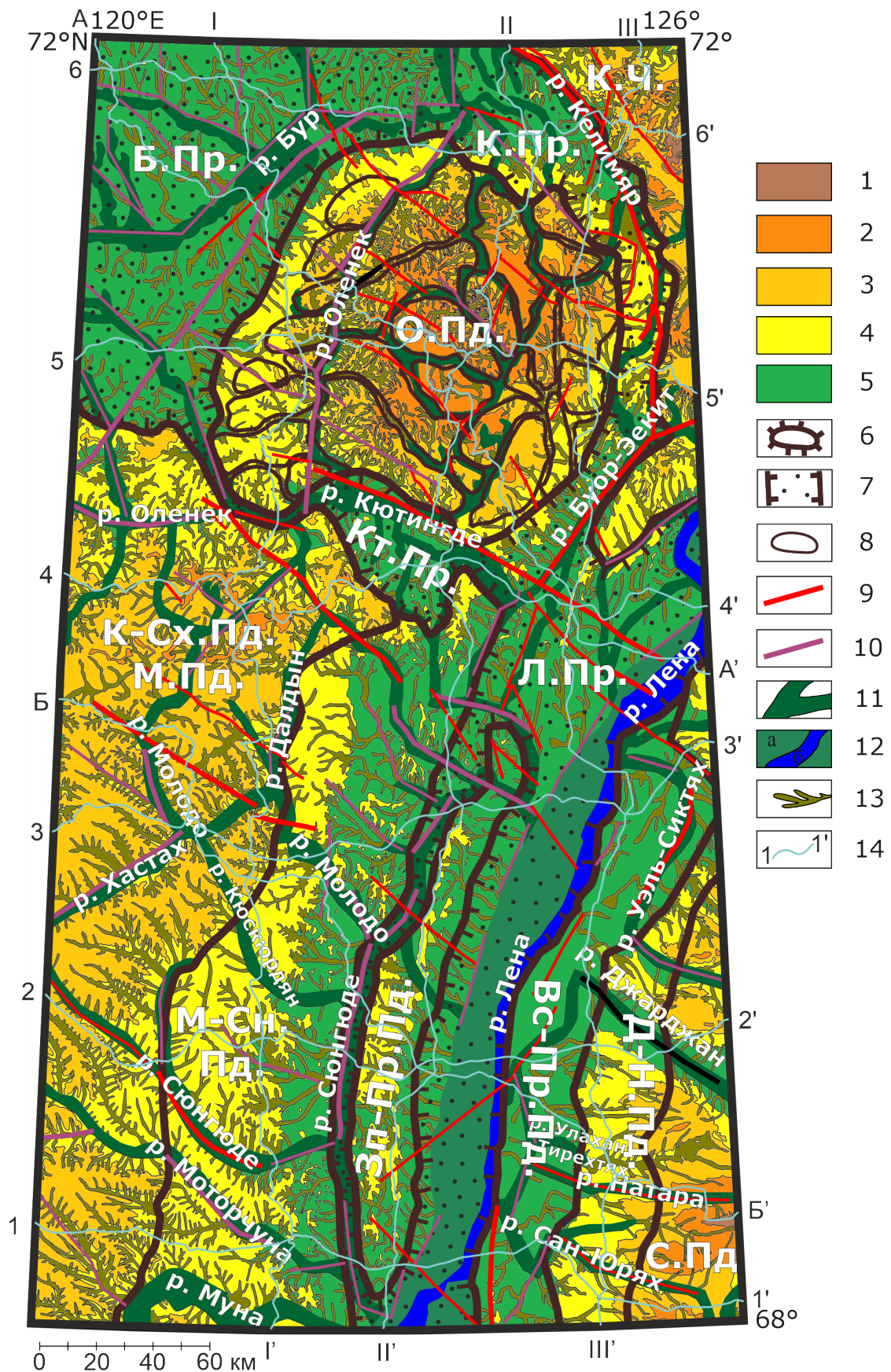


Рис. 3.3. Схема новейших пликативных и дизъюнктивных структур Лено-Оленекского междуречья. Масштаб 1:500 000. Составили Н.А. Гордеев, Т.В. Суханова.

1-5 – уровни поверхностей выравнивания (нерасчлененные по возрасту): 1 – 450-500 м; 2 – 350-450 м; 3 – 250-350 м; 4 – 150-250 м; 5 – 10-150 м; 6-9 – новейшие структуры: 6 – основные прогибы; 7 – прогибы; 8 – локальные поднятия; 9-10 – структуры донеотектонические: 9 – разрывные нарушения [по материалам ГГК РФ, 2013; ГГК СССР, 1960; 1975]; 10 – современные разрывные нарушения, дешифрируемые геоморфологическими методами и признаками; 11-13 – формы рельефа: 11 – долины крупных рек; 12 – а) пойма, б) русло р. Лена; 13 – эрозионная сеть; 14 – геоморфологический профиль по линиям. Буквами обозначены: северная часть схемы: О.Пд. – Оленекское поднятие, К.Ч. – кряж Чекановского, Б.Пр. – Бурский прогиб, К.Пр. – Келимярский прогиб, Кт.Пр. – Кютингдинский прогиб; южная часть схемы: К-Сх.Пд. – Куойско-Суханское (Мунское) поднятие, М-Сн.Пд. – Мунско-Сюнгюдинское поднятие, Зп-Пр.Пд. – Западно-Приленское поднятие, Л.Пр. – Ленский прогиб, Вс-Пр.Пд. – Восточно-Приленское поднятие, Д-Н.Пд. – Джарджан-Натарское поднятие, С.Пд. – Собопольское поднятие.

Новейшая структура северной части (Оленекского свода). *Оленекское новейшее поднятие (свод)* (О.Пд.). Наблюдается небольшая асимметрия свода: восточный склон более крутой, чем западный (Приложение Б¹-Б², профили 4-4', 5-5', 6-6', А-А', I-I', II-II', III-III'). Максимальные высоты 480-490 м отмечены в центральной и восточной частях свода. Они приурочены к новейшим поверхностям выравнивания олигоцен-раннемиоценового возраста, развитым на уже ранее отпрепарированных протерозойских (в восточной части обнажается выступ фундамента) и кембрийских породах. Поднятие дифференцировано на целый ряд локальных структур. Они оконтуривают наиболее высокую часть свода (здесь было выделено Хорбусуонское локальное поднятие), последовательно снижаясь ступенями к периферии, подчеркивая общее концентрическое строение поднятия. Возраст этих ступеней более молодой - от позднемиоценового до четвертичного. Некоторые локальные поднятия образуют кулисы. Кулисообразно расположенные поднятия в центральной части свода вдоль долины р. Оленек свидетельствует о том, что они развиваются в условиях правосдвиговых напряжений. На интенсивный рост свода указывает глубоко врезанная долина [Гордеев, Суханова, 2016].

Анализ линеаментов, выделенных в пределах исследуемой территории, показал, что в целом они образуют радиальный рисунок, отражающий современное развитие сводового поднятия. Отмечается преобладание линеаментов диагональных простираний. Так, например, Хорбусуонское локальное поднятие (см. рис. 3.3) приурочено к крупному «узлу» в основном диагональных систем линеаментов и древних разрывов. Линеаменты

северо-западной ориентировки проявляют хорошую сходимость с разрывными нарушениями [ГГК РФ, 2013; ГК СССР, 1975; ГК СССР, 1965] такого же направления. Однако преобладающими являются линеаменты северо-восточного простирания. Это говорит о том, что новейшая структура Оленекского поднятия, по сравнению с древней, формировалась в совершенно иных геодинамических условиях.

Кютюнгдинский прогиб (Кт.Пр.) выделяется на южном склоне Оленекского свода. Он расположен в бассейне р. Кютюнге, правого притока р. Оленек. Вытянут в северо-западном направлении. Это унаследованная с протерозоя неотектоническая структура, которая в виде ограниченного разломами грабена выделяется в структуре фундамента [ГГК РФ, R-52, 2013]. Позднее грабен выполнен отложениями каменноугольного периода. В рельефе – Кютюнгдинская депрессия – отчетливо выраженное понижение, широкое днище которого на северо-западе целиком занято долиной р. Кютюнге. Общее опускание прогиба по отношению к своду Оленекского поднятия достигает 250 м.

Поднятие кряжа Чекановского (К.Ч.) граничит с Оленекским сводом на востоке, протягиваясь с северо-запада на юго-восток. Это новообразованное поднятие, возникшее на западном крыле мезозойского Предверхоянского прогиба в самом начале новейшего этапа [Галабала, 1971]. Поднятие асимметричное: западный его склон круто обрывается к долине р. Келимьяр. Подножие склона разрывными нарушениями отделяется от Келимьярского прогиба. Восточный склон пологий, но также круто обрывается к долине р. Лена, таким образом, кряж Чекановского представляет собой горст. Слагающие его юрские и меловые песчаники и алевролиты полого моноклинально падают на северо-восток, образуя при этом квестовый рельеф.

Келимьярский прогиб (К.Пр.) оконтуривает Оленекское поднятие с севера. В настоящее время он испытывает поднятие, возможно, связанное с ростом и расширением Оленекского свода. Прогиб разделяет Оленекское поднятие и Кряж Чекановского. Долина наследует зону крупного регионального разрыва северо-западного простирания [Карта поверхностей..., 1972; Алексеев, 1958ф].

Бурский прогиб (Б.Пр.), к которому приурочена долина одноименной реки, оконтуривает Оленекский свод с запада. Он находится в юго-восточной части обширной Северо-Сибирской низменности, развитой над палеозой-мезозойским Оленекско-Анабарским прогибом. Поверхность низменности полого наклонена на юго-восток, в сторону русла р. Лена. Минимальная абсолютная высота - 21 м, максимальная - 153 м.

В целом все новейшие структуры, сопряженные с Оленекским сводом, подчеркивают его изометричную концентрическую форму.

Таким образом, Оленекское поднятие на протяжении длительной истории своего существования, с протерозоя до четвертичного времени, развивалось унаследованно, как положительная структура. Радиальный рисунок линеаментов на своде и периферии говорит о продолжающемся росте поднятия и на современном этапе. Кулисный характер локальных новейших структур, развитых в непосредственной близости с долинами Оленек, Келимьяр, Бур, Бур-Эекит, и коленообразный рисунок русел этих рек свидетельствуют о сдвиговых деформациях в пределах исследуемой территории в новейшее время.

Новейшая структура южной части (структуры обрамления Оленекского свода)

В новейшей тектонической структуре южная часть территории исследования представлена субмеридионально вытянутыми в северо-восточном направлении поднятиями и прогибами (рис. 3.3). Поднятия представляют собой последовательно спускающиеся с запада на восток в сторону долины Лены ступени рельефа. Все поднятия асимметричны (Приложение Б¹-Б², профили 1-1', 2-2', 3-3', Б-Б', I-I', II-II', III-III'). Основные водоразделы смещены к западному склону. По прямолинейным эрозионным формам выделены линеаменты, которые дифференцируют поднятия на целый ряд структур более высокого порядка. Большинство линеаментов выражены узкими руслами рек, и лишь некоторые дешифрируются по более широким, занятым речными долинами, прогибам [Новейш. Тект., об.зап., 1998].

На северо-западе территории выделяется **Куойкско-Суханское** поднятие (К-Сх.Пд.), вытянутое с юго-запада на северо-восток, где отмечаются наиболее высокие отметки рельефа - 335 м и более. Это высокая ступень, развитая над различными древними структурами: – на западе – над северной частью Суханской впадины, центральная часть наследует Анабарскую антеклизу, восточная – преимущественно южную часть древнего Оленекского свода – Куойкско-Далдынское поднятие. Поднятие выполнено, главным образом, кембрийскими отложениями. Долина реки Молодо, имеющая северо-западное простирание, делит поднятие на две части – западную и восточную. Выделенные линеаменты в западной части имеют тектоническую природу, наследуя древние разрывные нарушения северо-западной ориентировки в кембрийских отложениях. Поднятие восточной части, развитое над древним Куойкско-Далдыньским поднятием, имеет, скорее, сводовый характер. Его центральная часть более возвышена, периферические – понижены. Эрозионные формы имеют радиальное строение.

Восточнее выделяется более низкая ступень **Куойско-Суханского** поднятия. В целом в северном направлении можно отметить общее понижение поверхности рельефа. Максимальные абсолютные отметки рельефа отмечаются на юге - 320 м, минимальные (до 190 м) – на севере. В южной части поднятие имеет наибольшую ширину (до 50 км), к

северу оно постепенно сужается. В самом узком месте его ширина уменьшается до 10 км. Место максимального сужения отмечается прямолинейным антецедентным участком долины р. Молодо. Южная и центральная части поднятия сложены кембрийскими отложениями, на севере развиты вендские, каменноугольные и пермские карбонатно-терригенные толщи пород.

Куойско-Суханское поднятие ограничено с юга прямолинейным прогибом северо-восточного простирания, занятым долинами рек Хастах, Молодо и Далдын. Ширина прогиба от 1 до 3-4 км. Прогиб расположен в основании уступа двух разновысотных ступеней.

Мунско-Суханское поднятие развито над более древними разновозрастными тектоническими структурами. Южная, наиболее высокая часть поднятия, развивается над Мунским сводом. Свод со среднего палеозоя испытывает постоянное поднятие, поэтому на его склонах отложения этого возраста, как и более молодые, мезозойские и кайнозойские, практически отсутствуют. Центральная часть поднятия расположена над областью древних понижений: Моторчунским прогибом, Суханской и Сюнгюдинской впадинами. Наиболее пониженная часть поднятия, северная, развита над южным окончанием Оленекского свода – Куойско-Далдынским поднятием. Однако и в древней структуре – это, скорее, относительное понижение.

Восточная граница рассматриваемой ступени на юге проводится по основанию уступа, далее по долине р. Сюнгюде, севернее – вновь по хорошо выраженным уступам, по субмеридиональному участку р. Молодо и более мелким ее притокам северо-восточного простирания.

Мунско-Сюнгюдинское поднятие (М-Сн.Пд.) образует еще более низкую ступень в рельефе. Максимальные отметки рельефа (от 240-260 м) отмечаются на самом юге территории исследования. К северу они понижаются до 175 м. Вдоль восточной границы поднятия образуется пониженная полоса субмеридионального - северо-восточного простирания со средними значениями высот 140-150 м. Ширина ступени изменяется от 70 км на юге до 30 км на севере. Мунско-Сюнгюдинское поднятие выработано преимущественно на терригенных нижнеюрских отложениях.

В строении ступени выделяются более мелкие поднятия, имеющие северо-западные простирания. Они отделяются друг от друга относительно широкими (в среднем 2-4 км, максимально – до 10 км) прогибами, занятыми хорошо разработанными речными долинами Муны, Моторчуны, Сюнгюде, Кюскюрдяна, Молодо. Морфология прогибов разнообразна. Одни (долины рр. Моторчуна, Молодо) имеют близкие к прямолинейным формы, другие (Сюнгюде, Кюскюрдяна) образуют выпуклые к югу дуги. Последние могут

быть обусловлены сдвиговыми неотектоническими деформациями вдоль восточной границы Мунско-Сюгюдинского поднятия.

Южное поднятие – наиболее высокое (более 240 м) относительно прямолинейное асимметричное, с более пологими северным и восточным склонами, ограниченное долинами рр. Муна и Моторчуна. Моторчуна имеет спрямленную долину. Возможно, ее русло смещается к югу, подрезая склон активно растущего новейшего Мунского поднятия, развитого над древним Мунским сводом, сложенным кембрийскими и юрскими отложениями.

Расположенное севернее в междуречье Моторчуны и Сюгюнде узкое симметричное поднятие-седловина отмечено меньшими высотами (227-200 м), по сравнению со смежными поднятиями. Оно образовано частично над древним северным склоном Мунского свода и над Моторчунским прогибом. Выработано на кембрийских и юрских отложениях. В восточной части отмечается несколько небольших участков развития водораздельных галечников плиоценового возраста, которые относят к аллювиальным накоплениям быстрых потоков, неоднократно менявших русла, блуждавших по широкой площади. Такие галечники встречаются от нижнего течения р. Муна до низовьев р. Оленек, через долины рр. Моторчуна, Сюгюнде, Молодо, Кютюнде. При этом они алмазоносны. Залегает толща на размытой поверхности палеозоя и мезозоя на абс. выс. 170-200 м, понижающихся к северу до 45 м.

В центральной части выделяются два локальных поднятия, похожие морфологически, ограниченные долинами рек: дугообразными Сюгюнде и Кюскюрдя, и спрямленной Молодо. Они развиты над Сюгюдинской впадиной и выполнены в основном нижнеюрскими отложениями. В среднем течении Сюгюнде и в устье Кюскюрдя местами на водоразделах залегают плиоценовые галечники. Оба этих поднятия имеют признаки сдвиговых деформаций.

Самое северное локальное поднятие имеет наиболее низкие гипсометрические отметки (216-175 м). Его северная граница проходит по долине р. Усунку, образующей ровную дугу, выпуклую на север. Поднятие расположено в зоне сочленения крупных древних структур – Анабарской антеклизы и Приверхоянского краевого прогиба и сложено преимущественно пермскими и каменноугольными отложениями на западе и юрскими – на востоке. Вдоль долины р. Молодо выше впадения р. Сюгюнде, а также у восточной границы поднятия встречаются отложения галечника неогенового возраста, слагающего водораздельные участки. Здесь по различным данным выделяются разрывные нарушения северо-западного простирания, в том числе сдвиги. Участки долины реки Молодо, по которой проводится восточная граница Мунско-Сюгюдинского поднятия,

преломляются коленообразно, возможно, свидетельствуя о наличии здесь зоны новейшего тектонического нарушения.

Прогиб, выделенный по субмеридиональным участкам долин Моторчуна, Сюнгюде, Молодо, ограничивает с запада субмеридионально вытянутое *Западно-Приленское* поднятие (З-Пр.Пд.), развитое над восточным склоном Анабарской антеклизы. Поднятие сложено средне- и позднеюрскими отложениями. На всем протяжении оно имеет относительно выдержанную ширину 20-25 км. Наиболее высокие абсолютные отметки рельефа (204-241 м) зафиксированы в центральной его части вдоль правых берегов рр. Сюнгюде и Молодо. На высоких выровненных поверхностях развиты элювиально-делювиальные отложения. К югу, северу и в восточном направлении высоты плавно снижаются до 150 м. На пологих склонах наблюдаются процессы солифлюкции, развитие делювиального покрова. Вдоль восточной границы протягивается узкая протяженная пониженная ступень, выполненная фрагментами русел небольших рек северо-западного простирания. В пределах ступени высоты колеблются от 70-90 м. Ее рельеф относительно выровнен. Она развита на позднеюрских отложениях. Восточнее поднятие ограничено Ленским прогибом, полностью занятым долиной реки с поймой и молодыми террасами.

В пределах Приленского поднятия выделяются с юга на север последовательно три локальных положительных структуры, ограниченных с севера речными долинами рр. Оганнёв-Юряге, Таган-Хариялах и Молодо. Все поднятия фрагментированы линеаментами субширотной и северо-западной ориентировок. В южном и северном поднятиях некоторые линеаменты отражают на поверхности разрывные нарушения. Долина р. Молодо, являющаяся северной границей Приленского поднятия, также заложена по разрыву – левому сдвигу. В древней мезозойской структуре он смещает юрские и меловые отложения с горизонтальной амплитудой почти 10 км [Межвилк, 1970].

Ленский прогиб (Л.Пр.) – единственная крупная отрицательная структура на территории исследования. Прогиб протягивается согласно простиранию остальных структур – в субмеридиональном северо-восточном направлении. Он выделен по широкой долине р. Лена, включающей пойму, первую и вторую надпойменные террасы. Ширина долины изменяется от 10 до 30 км. Долина асимметричная – русло прижато к более крутому правому берегу. Пойма и террасы развиты преимущественно на левом берегу. Пойма имеет обширную ровную поверхность, изобилующую мелкими озерами, болотами, протоками, меандрирующими речными руслами. Первая надпойменная терраса выделяется практически по всему левому берегу и частично, в виде останцов, на правом берегу. Вторая надпойменная терраса развита локально по долинам правых притоков

р. Лена. Терраса эрозионно-аккумулятивная, абс. выс. – до 60 м, отн. выс. – до 25-40 м. Обращает на себя внимание морфология главного русла. В целом, оно состоит из преимущественно прямолинейных отрезков, местами разветвляющихся с образованием островов, имеет относительно выдержанную ширину на протяжении изучаемой территории. В центральной и северной частях территории наблюдаются участки преломления русла, местоположения которых соответствуют таким же резким изменениям направления русла в соседней долине р. Молодо. Это можно объяснить наличием субширотной сети трещиноватости или разрывных нарушений, вероятно, со сдвиговой компонентой. При пересечении таких зон субмеридиональными руслами рр. Лены и Молодо, последние изменяют ориентировку с субмеридиональной на северо-восточную и обратно. Ленский прогиб развит на крыле древнего Приверхоянского прогиба, сложенного меловыми отложениями.

Правый берег р. Лены более крутой и высокий. К востоку от прогиба выделяются субмеридиональные разновысотные ступени, последовательно повышающиеся с запада на восток. Все эти структуры сформировались над Приверхоянским прогибом, под которым, в свою очередь, находится Лено-Алданский глубинный мезопротерозойский орогенный пояс. Поднятия развиты на нижнемеловых отложениях. В пределах ступеней выделяются линеаменты преимущественно северо-западного простирания, некоторые из них имеют тектоническую природу. Они развиты преимущественно по долинам крупных рек Натара, Джарджан, Сян-Юрях, Уэль-Сиктях – притоков Лены.

Восточно-Приленское поднятие (В-Пр.Пд.), представляющее собой относительно низкую ступень (52-155 м) с выдержанной шириной (30-40 км) и аккумулятивной поверхностью, непосредственно примыкает к Ленскому прогибу. На западе он ограничен руслом р. Лена, восточной границей является основание уступа к более высокой поверхности. Минимальные отметки фиксируются на водоразделе рек Натара и Улахан-Тирехтях в их низовьях, максимальные – в южной части поднятия. Широкая доледниковая долина р. Лены с фрагментами цокольных террас средне- и позднеплейстоценового возраста погребена под такого же возраста ледниковыми, водноледниковыми отложениями тазовского, муруктинского и сартанского оледенений и криогенными образованиями [Сакс, 1947]. У крупных притоков р. Лены также есть пойма, первая и вторая террасы.

Джарджан-Натарское поднятие (Дж-Н.Пд.) выделено восточнее. На водоразделе одноименных рек в центральной части поднятия находятся его наивысшие отметки (более 280 м). Минимальные высоты фиксируются в основном в современных эрозионных врезах (до 150-100 м). В целом, поднятие асимметрично – его водораздел смещен к востоку.

Ширина постепенно уменьшается с юга на север. Большинство рек имеют северо-западную ориентировку и антецедентно пересекают поднятие. Как и Восточно-Приленское, Джарджан-Натарское поднятие имеет аккумулятивную поверхность, сложенную преимущественно ледниковыми и водноледниковыми отложениями, выполняющими гряды, холмы, валы, а также зандры.

В самой восточной части исследуемой территории выделяется наиболее высокая **Собопольская** ступень (С.Пд.). Абсолютные отметки высот изменяются в широких пределах – от 260 м на севере до 460 и более метров на юге, в междуречьях Далдын – Натара, Огоннёр-Юряге – Далдын. Здесь имеет место обращенный рельеф. Ступень развита над мезозойским Приверхоянским прогибом, над наиболее пониженной его частью – Собопольской впадиной, заполненной нижнемеловыми отложениями. В современном рельефе – это холмисто-западинные поверхности, сформированные ледниками. Водоразделы покрыты преимущественно ледниковыми и водноледниковыми отложениями трёх позднеплейстоценовых оледенений – двух стадий муруктинского и сартанского.

В пределах ступени, кроме северо-западных, дешифрируются линеаменты субширотного и северо-восточного простираний, которые отражены в основном в прямолинейных отрезках многочисленных русел и разделяют общее субмеридиональное поднятие на более мелкие. Некоторым линеаментам в разрезе осадочных отложений соответствуют разрывные нарушения, главным образом, сбросовой и сдвиговой кинематики [Гордеев, Суханова, 2016; Суханова и др. 2016].

На 3D модели чехла (рис. 3.4) просматривается наследственность между новейшими и древними структурами, а также инверсионные (при совмещении с данными по геологии, см. главу 1). 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 являются Мунско-Сюнгиудинское поднятие, Келимярская впадина, так как их эволюция связана с развитием смежных структур [Гордеев, 2018].

Для Келимярской впадины это воздействующее (оказывающее давление) Оленекское поднятие с запада и кряж Чекановского с востока. Для Мунско-

Сюнгюдинского поднятия – Куойско-Суханское поднятие с запада и воздействующий Верхоянский хребет с востока. Кроме этого, в новейших структурах наблюдается характерный след воздействия со стороны Верхоянского хребта – образование куэстового (квестового) рельефа.

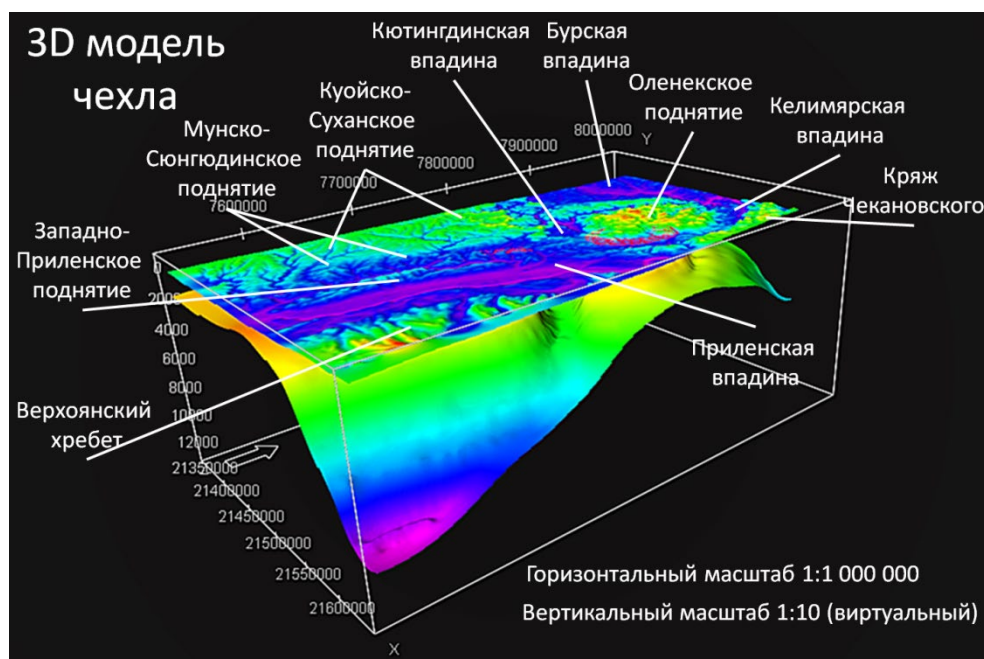


Рис. 3.4. Объемная модель поверхностей, фундамента и дневной.

Куэстовый облик принимает рельеф таких структур, как Западно-Приленское и Мунско-Сюнгюдинское поднятия. Их восточные крылья пологие, а западные крутые. Такое же строение наблюдается на всем протяжении Кряжа Чекановского.

Выводы. 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 Кютийгинским грабеном – Кютийгинская впадина, на северо-западном крыле Оленёкского поднятия над Лено-Анабарским прогибом – Бурская впадина, на северо-восточном крыле Оленекского поднятия – Келимйарская 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. Восстановление полей напряжения и геодинамические реконструкции северо-востока Сибирской платформы

4.1. Общая характеристика напряженного состояния

Данный раздел написан с использованием и переработкой следующих работ [Гордеев, 2021; Гордеев, Сим, 2020; 2020а; 2020б; 2019; 2019а; Сим, Гордеев, 2021; Сим, Ребецкий, Гордеев, 2019; Сим, Маринин, Жиров, Гордеев, 2018; Сим Л.А., Маринин А.В., Брянцева Г.В., Гордеев Н.А., 2018; Сим, Гордеев, Маринин, 2018].

Получена схема новейших тектонических напряжений северо-востока Сибирской платформы (рис. 4.1.1). Данная схема составлена по четырем топографическим картам масштаба 1:1 000 000, на которых предварительно были выделены все известные по разным источникам разрывы [ГГК, R-(50)-52, 1983; ГГК, S-50, S-51, S-52, 2011; ГГК, R-51, 2013; ГГК, R-52, 2016] как элементы основной структуры. Для того чтобы охарактеризовать общее поле напряжений территории исследования, в работе проведен детальный линеаментный анализ, в основу которого легло построение роз-диаграмм [Трешиноватость ..., 2008] по разным параметрам геологических структур, а также для осей сжатий 1 и 2 рангов.

Для определения особенностей современных геодинамических условий, в которых развиваются все новейшие структуры территории Лено-Оленекского междуречья, и восстановления полей напряжений был применен структурно-геоморфологический (СГ) метод анализа сопряженных с основным разломом вторичных нарушений, базирующийся на результатах тектонофизического моделирования [Сим Л.А., 1991]. В качестве разломов были использованы разрывные нарушения (как достоверные, так и предполагаемые), выделенные по данным Геологической карты [R-52, 2013] 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 дешифрованные вблизи разломов в зоне их динамического влияния посредством использования программы SimSGM [Гордеев, Сим, 2020; Гордеев, Молчанов, 2020, 2019].

На основе полученных результатов выделены 2 ранга полей напряжений по преобладающим направлениям осей сжатия. Если в одной из областей распространения напряжений преобладающее количество осей сжатия тяготеет к некоторому направлению, то это направление принимается за доминирующее в выбранной области и ему присваивается второй ранг. Однако если в соседних областях с разными

направлениями осей сжатия возникают одинаковые максимумы, то эти области объединяются, поскольку выбранный максимум удовлетворяет им обеим, взятым вместе либо по отдельности. Это служит основанием для выделения поля напряжений 1-го ранга [Сим, Гордеев, 2021].

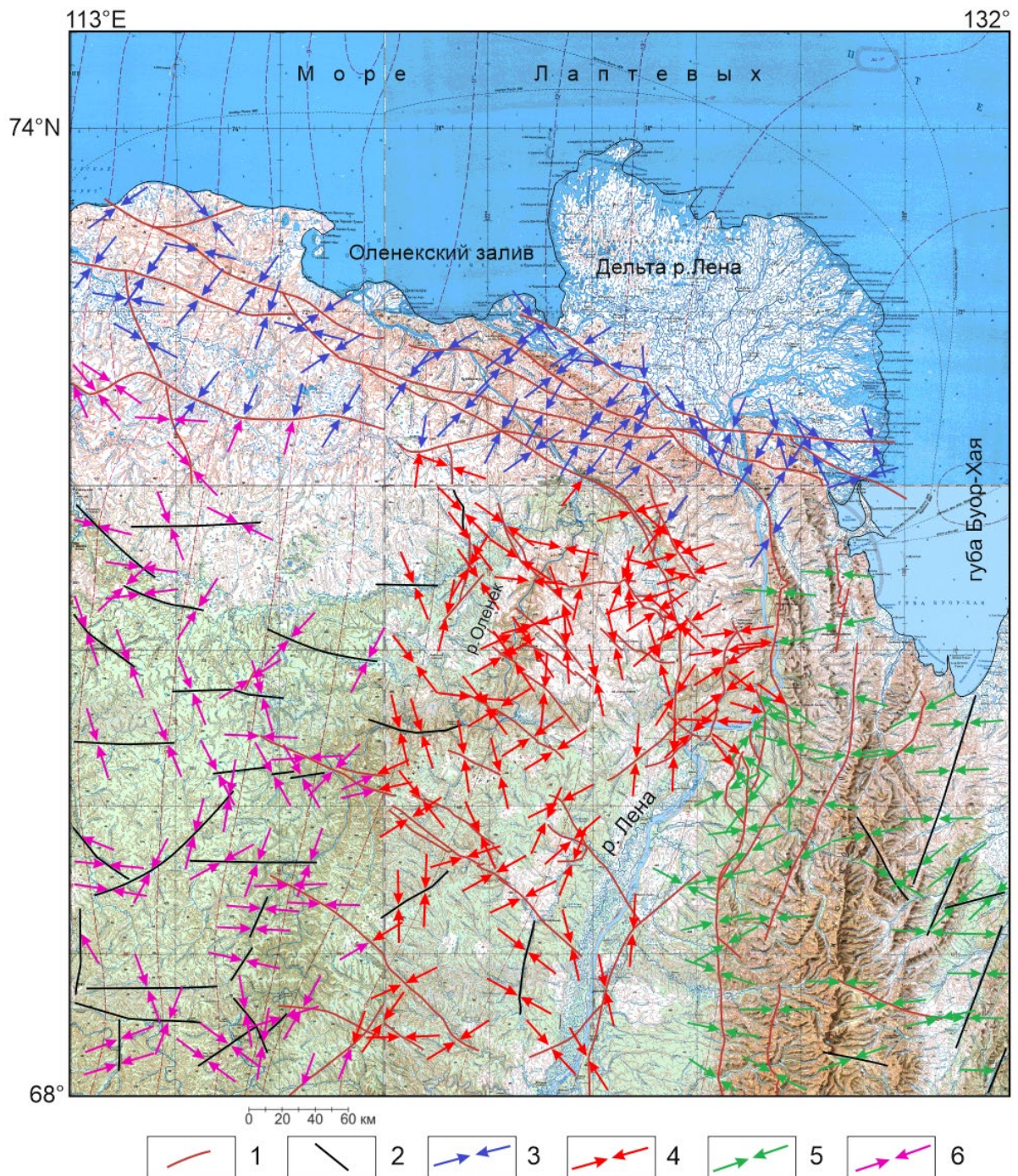


Рис. 4.1.1. Схема новейших тектонических напряжений северо-востока Сибирской платформы. Масштаб: 1: 1 000 000. Составили Н.А. Гордеев, Л.А. Сим.

1 – разрывы; 2 – линеаменты; 3-5 – оси сжатия, приуроченные к: 3 – Лаптевоморской; 4 – центральной; 5 – Верхоянской; 6 – западной областям.

На схеме выделяется 4 поля напряжений 2 ранга: 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 становится видно доминирование субмеридионального сжатия. Прочие поля напряжений, относящиеся к локальным структурам территории, имеют подчиненное значение. Выделяются следующие поля напряжений второго ранга: с северо-восточным простиранием (рис. 4.1.2, а; 53 оси сжатия), характеризующее Лаптевоморскую область с кряжем Чекановского; (рис. 4.1.2, б) с субширотным максимумом по 48 измерениям в Верхоянской области; (рис. 4.1.2, в) центральная область с Оленёкским и Мунским поднятиями, характеризующаяся неустойчивыми ориентировками осей сжатия с субширотным и субмеридиональным максимумами с радиальной составляющей по 78 измерениям; а также западный регион, охарактеризованный по 52 измерениям 2-мя субмеридиональными максимумами и одним субширотным (рис. 4.1.2, 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. 4.1.2, д) как деформирующуюся в поле напряжений 1-го ранга с субмеридиональной осью сжатия [Гордеев, Сим, 2018; Сим и др., 2019].

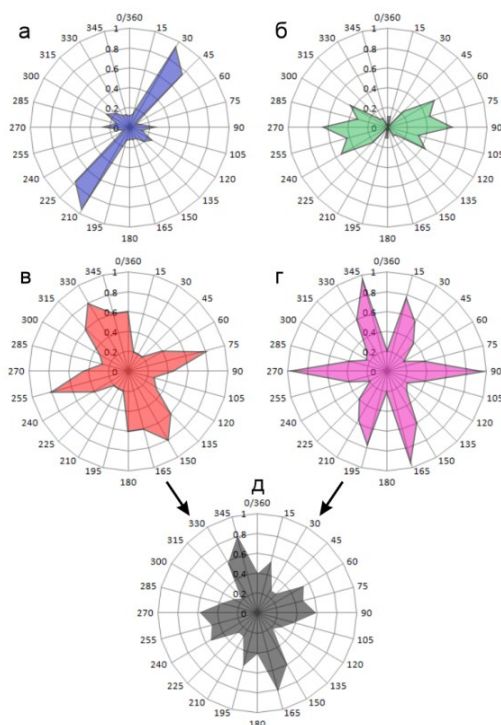


Рис. 4.1.2. Розы-диаграммы реконструированных осей сжатия: а – Лаптевоморская область; б – Верхоянье; в – центральная область; г – западная область; д – суммарная для центральной и западной областей.

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

Таким образом, принято, что сдвиговое поле напряжений всей исследованной территории характеризуется неотектоническими субмеридиональными осями сжатия I-го ранга на северо-востоке Сибирской платформы без учёта краевых прогибов, неотектоника которых обусловлена иной геодинамикой, чем на платформе. Этим **обосновывается 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

Исследуемый регион относится к сочленению Оленекского поднятия, Предверхоянского краевого и Лено-Анабарского прогибов на континентальной части (рис. 4.2.1) и шельфовой области с южным окончанием хребта Гаккеля, привлеченной только для анализа геодинамики северо-востока Сибирской платформы. Выяснение геодинамических условий формирования новейших структур и их напряженно-деформированного состояния на северном регионе Сибирской платформы привело к неожиданному результату: Арктический спрединг распространяет свое влияние лишь на развитие шельфовой части, а на континенте – на Лаптевоморскую область и кряж Чекановского.

Проведенный тектонофизический анализ с применением программы SimSGM [Гордеев, Молчанов, 2018], которая основана на структурно-геоморфологическом методе реконструкции сдвиговых тектонических напряжений Л.А. Сим [Сим, 1991], показал большое количество локальных стресс-состояний (Лаптевоморская область (рис. 4.2.1)) с осями сжатия восток-северо-восточной ориентировки. Такое положение осей сжатия свойственно разломам субширотного простирания на протяжении всего участка Лено-Анабарского прогиба с выявленной лево-сдвиговой кинематикой разломных структур. Такие ориентировки отличаются от ориентации осей сжатия в других областях территории исследования. Так, 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.

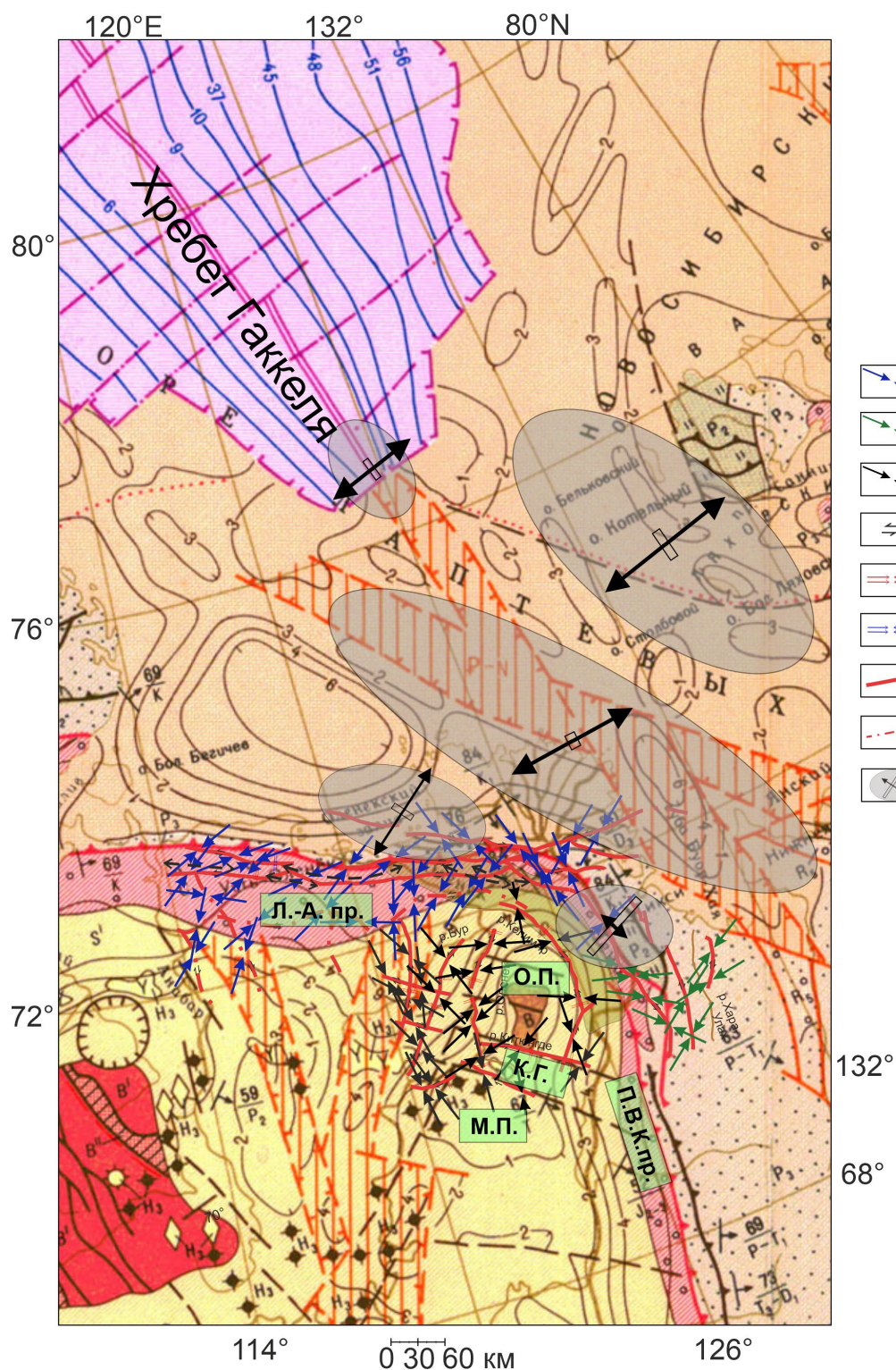


Рис. 4.2.1. Обобщенная карта геодинамики северо-востока Сибирской платформы с наложенной схемой [Сим, Гордеев, 2021]. Составлена на основе [Геодинамическая карта России. Масштаб 1:10 000 000. В.А.Буш, Л.М. Натапов, 1995]. Составил Н.А. Гордеев.

1-3 – Области сжатия: 1 – Лаптевоморская; 2 – Верхоянская; 3 – центральная; 4 – направления сдвигов; 5-6 – обстановки дополнительного: 5 – сжатия; 6 – растяжения; 7 – разрывы [ГТК, R-(50)-52, 1975; ГТК, S-50, 2017; ГТК, S-51, S-52, 2015; ГТК, R-51, 2013; ГТК, R-52, 2015]; 8 – погребенные разрывы [ГТК, R-(50)-52, 1983; ГТК, S-50, S-51, S-52,

2011; ГГК, R-51, 2013; ГГК, R-52, 2016]; 9 – области напряжений по сейсмологическим данным, стрелки – проекция оси растяжения, прямоугольники – проекция оси сжатия [Имаева, 2016; Имаева, 2017]. Буквами обозначены крупные тектонические структуры: О.П. – Оленекское поднятие; О.М. – Мунское поднятие; К.Г. – Кютингдинский грабен; П.В.К.пр. – Предверхоянский краевой прогиб; Л.-А.пр. – Лено-Анабарский прогиб.

Был проведен сравнительный анализ с данными о механизмах очагов землетрясения (МОЗ) [Имаев, Имаева, 2000; Имаева, 2016; 2019], по которым в большинстве определенных нами стресс-состояниях оси сжатия в Лаптевоморской области ориентированы ортогонально проекциям осей главного сжатия в механизмах очагов землетрясений. Противоречия могут быть связаны с тем, что двумерный СГ метод допускает, что одна из горизонтальных осей сжатия или растяжения может соответствовать промежуточной оси σ_2 , когда напряженное состояние вблизи анализируемого участка близко к одноосному растяжению ($\sigma_3 \approx \sigma_2$). Значительная разница между величинами σ_1 и горизонтальной σ_2 в случае состояния, близкого к обстановке растяжения, может способствовать формированию сдвигового перемещения по разлому с формированием соответствующей триады оперяющих разрывов. Для проверки индексации осей главных напряжений, восстановленных СГ методом, требуется привлечение дополнительных данных – либо восстановление трехмерными полевыми методами тектонические напряжения, либо сейсмологические данные.

В Лаптевоморской области произведена проверка истинности индекса восстановленной СГ методом оси сжатия, которая находится в обстановке растяжения, фиксируемой по сейсмологическим данным и является, по всей видимости, промежуточной осью σ_2 .

По характеру распределения реконструированных осей сжатия видно, что Лаптевоморское побережье реагирует компенсацией на многочисленные области с геодинамическим режимом растяжения [Гончаров, 1979, 1988]. Т.е. в области с геодинамическим режимом растяжения по простиранию оси растяжения действует сжатие. Лаптевоморское побережье реагирует на многочисленные соседние области с геодинамическим режимом растяжения компенсированным наведенным сжатием.

Южнее Лаптевоморской области расположились Оленекское поднятие и Лено-Хатангская впадина. Характер распределения осей сжатия на рассматриваемой территории на первый взгляд хаотичный. Однако, Оленекское поднятие оконтурено

разрывами, по которым восстанавливается радиальный рисунок расположения осей сжатия (см. рис. 4.2.1), что является ярким признаком собственного источника напряжения, никак не связанного с тектоникой моря Лаптевых. Лено-Хатангская впадина имеет своеобразный рисунок осей сжатия, в пределах которого находятся вытянутые участки с разным простиранием осей сжатия: северо-западное, северо-восточное и субширотное (см. рис. 4.2.1, см. рис. 4.1.2).

Таким образом, наличие радиально расположенных и ориентированных главных осей сжатия вокруг Оленекского поднятия указывает на наличие внутриплитных источников напряжений, никак не связанных с влиянием Арктики. Подтверждена независимость формирования Оленекского поднятия и влияние арктического спрединга (хребет Гаккеля) на формирование обрамляющих с северной стороны Оленекского поднятия структур, которые находятся в пределах прибрежной зоны моря Лаптевых.

Тектоническое и геологическое строение Лаптевоморского региона

Море Лаптевых находится в области сочленения Сибирской платформы и трех складчатых поясов: на западе – Южно-Таймырского пояса, на юге – Верхоянской складчатой системы и Новосибирско-Чукотского складчатого пояса [Андиева, 2008; Драчев, 2000]. Подробная схема тектонического строения южного окончания хребта Гаккеля (его глубоководной впадины) и шельфовой части моря Лаптевых показана в работе Е.А. Гусева [2002] (рис. 4.2.2).

Тектоническая структура моря Лаптевых напрямую связана с раскрытием хребта Гаккеля, которое началось около 56-57 млн. лет назад в палеоцене (см. рис. 4.2.1) [Лобковский, 2004, 2016; Савостин, 1984; Hindle, 2011] и продолжилось до начала плиоцена, после чего с середины плиоцена по настоящее время начался период редуцированного рифтогенеза [Драчев, 2000]. Подобную историю развития связывают с миграцией Эйлерового полюса вращения Евразийской и Северо-Американской плит [Савостин, 1984]. Миграция полюса происходила с севера Гренландии (около 55 млн. лет назад – начало эоцена) [Лобковский, 2016] на северную часть Новосибирских островов (около 36 млн. лет назад – конец эоцена – начало олигоцена), далее полюс сместился в район Дальнего Востока (хр. Джугджур) (около 20 млн. лет назад – начало миоцена) [Савостин, 1984]. Однако, за последние 5 млн. лет полюс снова сместился на север к району побережья залива Буор-Хая [Драчев, 2000].

Шельфовую область представляет собой Лаптевский бассейн, который нарушается эпипозднемезозойской Новосибирской системой грабенов и горстов [Гусев, 2002].

Природа фундамента шельфа моря Лаптевых является предметом дискуссий [Андиева, 2008; Гусев, 2002; Виноградов, 2000]. Существует две полярные точки зрения насчет возраста фундамента и осадочного чехла:

- 1) «складчатые мезозойские комплексы перекрыты осадочным чехлом верхнемелового-кайнозойского возраста мощностью от 0.5 до 1 км. В пределах шельфа в геофизических полях идентифицируются линейaments северо-западного простирания, согласные направлению складчатых структур мезозоид.» [Гусев, 2002];
- 2) «повсеместное распространение позднекиммерийского фундамента и кайнозойский возраст осадочного чехла» [Андиева, 2008].

В настоящей работе рассматривается новейший тектонический этап и напряжения северо-востока Сибирской платформы, однако детальное изучение фундамента глубоководной части шельфа моря Лаптевых не является предметом исследования, поскольку в данной работе рассматриваются структурно-тектонические условия на суше.

В связи с этим принимается первая концепция возраста фундамента и осадочного чехла моря Лаптевых, т.к. на разрезе через море Лаптевых и континентальную часть Сибирской платформы (рис. 1.3.5) видно, что меловые-нижнекайнозойские отложения смяты в складки и разбиты разрывами и лишь верхнемиоценовые-четвертичные отложения не нарушены.

В пределах Новосибирской системы грабенов и горстов выделяются грабенообразные прогибы: Бельковско-Святоносский, Анисинский, Небен, Новосибирский, Котельнический и Анжу». [Гусев, 2002].

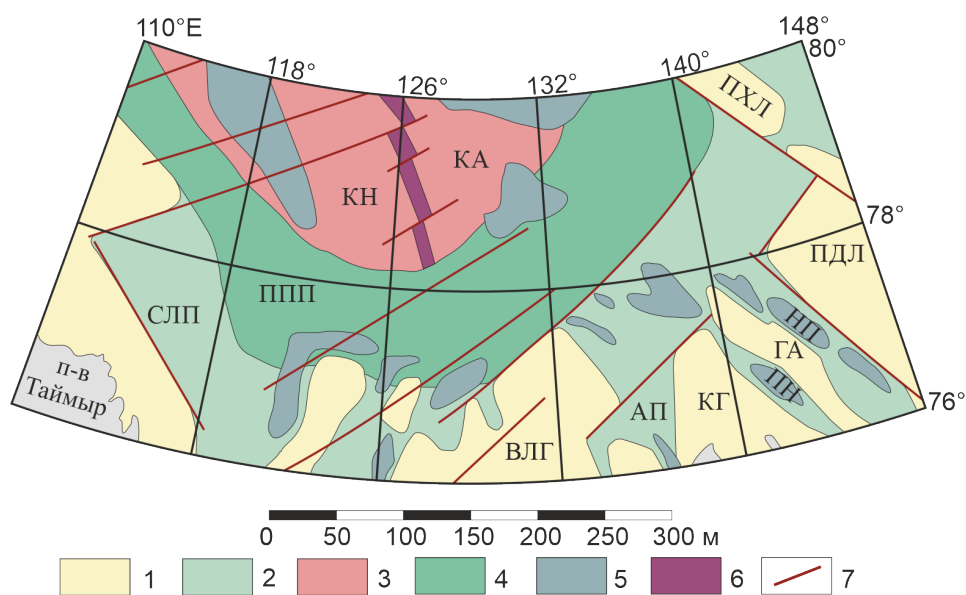


Рис. 4.2.2. Региональная тектоническая схема [Гусев, 2002]. С упрощениями И.В. Бондарь, Н.А. Гордеев.

1 – горсты и структурные поднятия на континентальной коре: ВЛГ - Восточно-Лаптевский горст, КГ – Котельнический горст, ПДЛ - поднятие Де-Лонга, ГА – горст Анжу, ПХЛ – поднятие хребта Ломоносова; 2 – грабенообразные прогибы рифтогенной природы и структурные понижения: СЛП – Северо-Лаптевский прогиб; 3 – океаническая кора: КН – котловина Нансена, КА – котловина Амундсена; 4 – структурная терраса континентального склона: ППП – Присевероземельский периокеанический прогиб; 5 – депоцентральные части грабенообразных прогибов на шельфе и периокеанических прогибов, сформированных на коре переходного типа: АП – Анисинский прогиб, ПН – прогиб Небен, НП – Новосибирский прогиб; 6 – рифтовая долина хребта Гаккеля; 7 – разломы.

В целом Лаптевоморский шельф имеет региональную зональность, почти все грабены и горсты простираются в северо-западных румбах. Грабены представляют собой асимметричные долины с поднятым левым (юго-западный) и опущенным правым (северо-восточный) бортами. Разделяют их горсты. В целом грабены и горсты имеют террасированную структуру. Вдоль этих структур происходили сдвиговые деформации северо-восточного простирания [Заварзина, 2012; Андиева, 2008; Драчев, 2008]. По сейсмическому профилю выделяется ряд крупных структур в шельфе: Южно-Лаптевский прогиб, Усть-Ленская и Бельковско-Святоноская ветви рифтовой системы, разделенные Восточно-Лаптевским горстом [Полякова, 2017] (рис. 4.2.3 и рис. 4.2.4). Распределение полей напряжений шельфа моря Лаптевых характеризует закономерности структурного плана. Площадное распределение геометрически схожих структур свидетельствует об общем региональном поле растяжения северо-восточной ориентировки [Гусев, 2002].

«В состав осадочного чехла входят три главных сейсмостратиграфических подразделения, соответствующих мел-палеоцену, эоцену-среднему миоцену и верхнему миоцену-квартеру» [Полякова, 2017].

Покрывающими отложениями чехла являются неоген-четвертичные. В представленном исследовании акцент в геологическом строении стоит на развитии разломов и структур. Для этого были отобраны пять демонстрационных геолого-геофизических разрезов.

По разрезу на рис. 4.2.5 видно, что хребет Гаккеля достаточно активен в настоящее время для того, чтобы создавать условия для формирования современных разрывов, которые пересекают четвертичные отложения.

Разрез через линию С-С' на рис. 1.3.5 демонстрирует, что шельфовая часть моря Лаптевых также, как и континентальная разбита разрывными структурами, но неоген-

четвертичные отложения не нарушены. Область активного влияния от раскрытия хребта Гаккеля заметно сокращается. Недалеко от скважины «Оленёк» (см. рис. 1.3.5) наблюдается крупный тектонический вал в виде крупной антиклинальной складки.

На (см. рис. 1.3.6) изображены разрезы, на которых особое внимание привлекает наличие крупной антиклинальной складки недалеко от прибрежной зоны моря Лаптевых. Таким образом, выделяется крупный тектонический вал, проявленный в отложениях всего фанерозоя в виде крупной антиклинальной складки, нарушенной субширотными левосбросовыми разрывами.

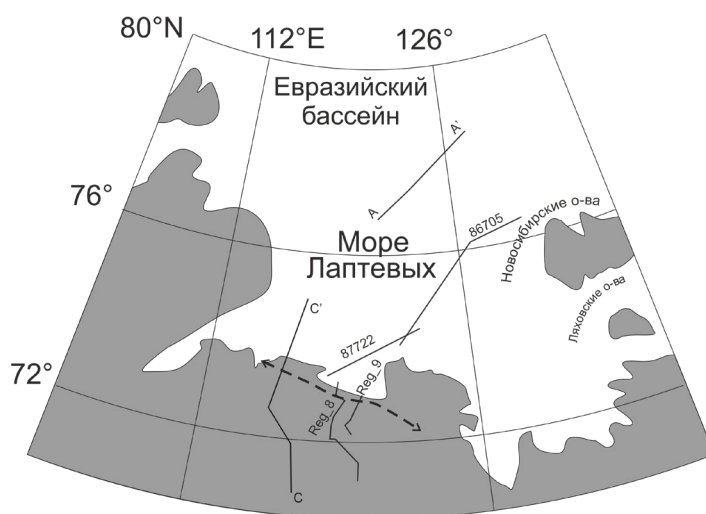


Рис. 4.2.3. Расположение сейсмологических профилей. Штрихпунктирной линией показан тектонический вал.

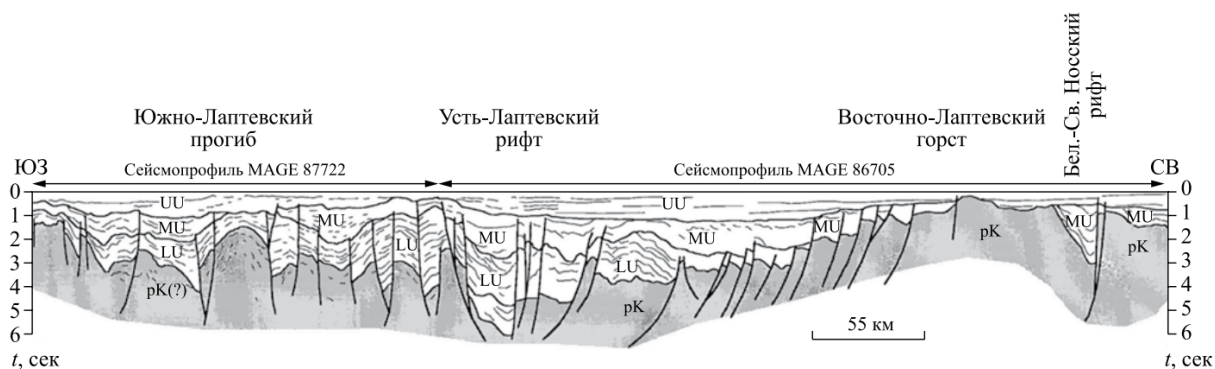


Рис. 4.2.4. Сейсмогеологический разрез рифтовой системы Лаптевского шельфа вдоль профилей 87722 и 86705 [Полякова, 2017].

LU, MU и UU – нижний (мел–палеоцен), средний (эоцен–средний миоцен) и верхний (верхний миоцен–квартер) сейсмокомплексы.

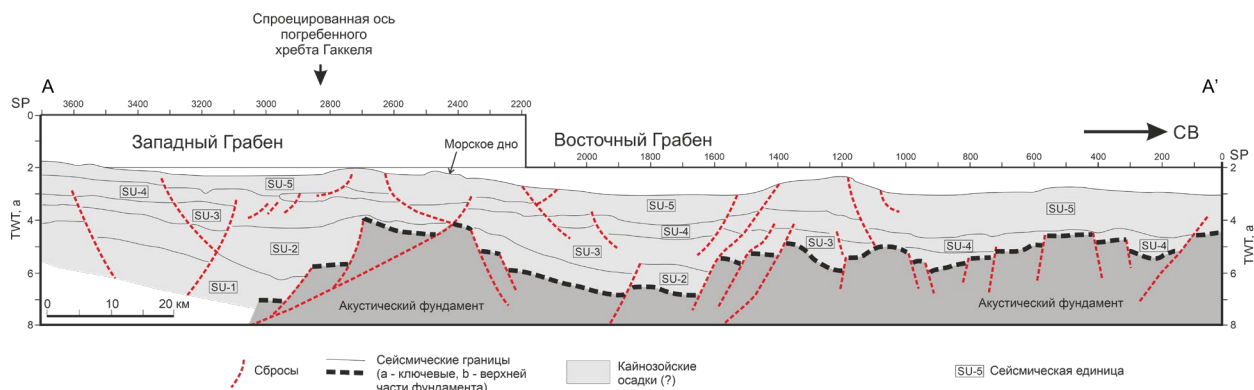


Рисунок 4.2.5. Сейсмологический разрез по линии А-А' через хребет Гаккеля [Drachev, et al, 2003] с упрощениями Н.А. Гордеев, И.В. Бондарь.

Новейшими структурами северного окончания Сибирской платформы являются Верхоянский ороген, Оленёкское поднятие, кряж Чекановского. Все структуры рассечены новейшими и реактивизированным в новейший этап разрывами. Тектонический вал, по-видимому образовался также в новейший этап, так как в разрезе он имеет схожие мощности со стратиграфическими подразделениями Лено-Анабарского прогиба (рис. 1.3.5). Вал ограничен разрывами.

Тектонофизические реконструкции и геодинамика

Геодинамические условия формирования новейших структур и их напряженно-деформированного состояния на северо-востоке Сибирской платформы являются одними из приоритетных задач представленного исследования. Предметом обсуждения является влияние Арктического спрединга на развитие ВСВ приморской части исследуемого района и кряжа Чекановского [Гордеев, Сим, 2019; 2020б].

Проведен тектонофизический анализ с применением программы SimSGM [Гордеев, Молчанов, 2018, 2019], который 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. 4.2.6), что 6 из них являются сбросовыми, 6 – сдвиговыми и 1 – взбросовым. 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 которым выделен тектонический вал; его ось отображена на (см. рис. 4.2.6). Этот вал 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.

Восстановленные сдвиговые тектонические напряжения хорошо коррелируют с распределением сдвиговых фокальных решений МОЗ [Гордеев, Сим, 2019а; 2019б].

В области развития кряжа Чекановского преобладают северо-восточные ориентировки осей сжатия. Локальные стресс-состояния с северо-восточной ориентировкой отражают наличие компенсационных напряжений, вызванных развитием хребта Гаккеля. Проявляются северо-западные ориентировки ближе к шельфу, в дельте р. Лена и Оленёкском заливе. По-видимому эти определения низшего ранга и реагируют на проявления современной сейсмичности [Гордеев, 2021].

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 кряж 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, 2014] 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 простирания (см. рис. 4.1.2).
6. Анализ МОЗ показал изменение геодинамического типа со сбросового на шельфе к сдвиговому на крыже Чекановского.

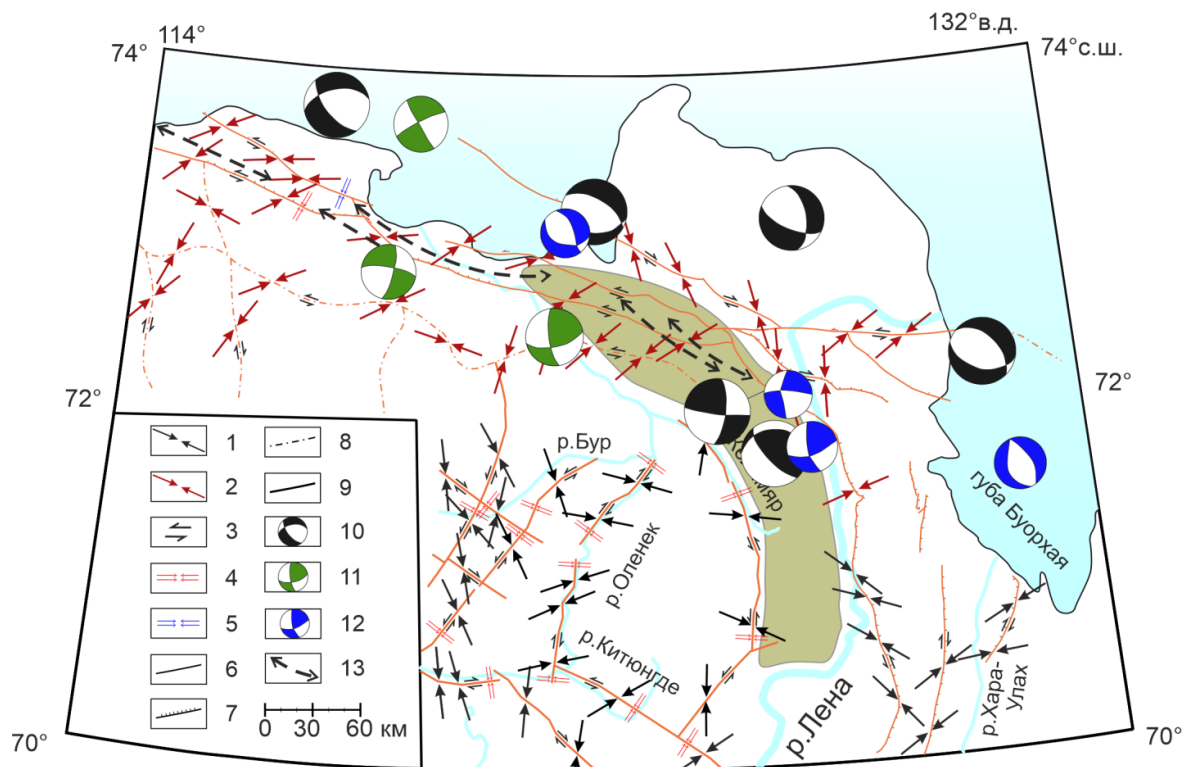


Рис. 4.2.6. Схема геодинамики прибрежной части моря Лаптевых, рассчитанная с помощью SimSGM [Гордеев, 2019]. Масштаб 1:500 000. Составили [Гордеев, Сим, 2021].

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; 10-12 – фокальные решения механизмов очагов землетрясений (МОЗ): 10 – [Imaeva et al., 2017]; 11 – [Grachev et al., 2003]; 12 – [Engen et al., 2003]; 13 – ось тектонического вала.

Восстановленная связь между структурным планом, полем напряжения и современной сейсмичностью дает общую картину геодинамики. Область динамического влияния хребта Гаккеля со стороны Сибирской платформы ограничена тектоническим валом и диффузной границей в области шельфа моря Лаптевых и Верхояно-Колымской складчатости. Регион исследования внутри Сибирской платформы имеет собственные источники напряжений и самостоятельный структурный план, не имеющий дальнедействующих наведенных напряжений [Гордеев, Сим, 2020].

Таким образом, выделяется стабильно развивающаяся глубинная структура на краевом участке Сибирской платформы в виде тектонического вала, который по-видимому, является хорошей преградой от воздействия внешних наведенных сил. И поэтому южнее тектонического вала проявляются обособленные источники напряжения, такие как Оленёкское и Мунское поднятия, ограниченные ярко-выраженными впадинами.

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 Оленекского и Мунского поднятий

В диссертации упоминаются источники внутриплитных напряжений. Природа избыточных горизонтальных напряжений может быть связана как с давлением от дивергентных или конвергентных границ литосферных плит, так и с возникающими напряжениями при вращении Земли.

«Помимо перечисленных способов реализации внутриплитных напряжений существует объяснение [Rebetsky, 2008] остаточных гравитационных напряжений или (ГНС – гравитационное напряженное состояние). Присутствие внутренних литосферных процессов в коре плит в виде вертикальных восходящих движений, вызванных выталкивающими силами (например, восходящий тепловой поток) на подошве коры или литосферы. В ходе эрозии и денудации (экзогенных процессов в целом) происходит разгрузка остаточных горизонтальных гравитационных напряжений при эксгумации пород во время воздымания к поверхности» [Rebetsky et al., 2017; Гордеев, Сим, 2020].

Также существует точка зрения, по версии которой происходит планетарная активизация в новейшее время [Ollier, Pain, 2019]. Она заключается в том, что вертикальные движения произошли одновременно по всему Земному шару и никак не связаны с тектоникой плит. Если в данной работе принять подобный механизм, то формирование всех исследованных новейших структур окажется связанным с более глобальными процессами, чем рассматриваемые в настоящей работе.

Схема новейших тектонических напряжений Лено-Оленекского междуречья (рис. 4.3.1) составлена по двум топографическим картам масштаба 1:500 000 с использованием, как автоматического (в ПО SimSGM), так и ручного способов. По топографической основе предварительно выделены линеаменты, представляющиеся как

элементы новейшей структуры. Линеаменты, по мнению автора, являются ослабленными зонами (трещиноватость или разрывы).

В пределах Оленекского поднятия ориентировки осей сжатия I ранга расположены радиально. При этом оси сжатия II ранга характеризуют разрывы соответствующего ранга и скорее разнонаправлены, что свидетельствует о том, что поднятие, зародившееся еще в протерозое и унаследованно развивающееся с палеозоя, после палеогеновой пенепленезации продолжает активно расти и в настоящее время. Воздымание сопровождается радиальным растрескиванием [Гордеев, 2016б]. Что касается осей сжатия II ранга, то они ориентированы соответственно локальным напряжениям, возникающим в результате развития структур более низкого ранга. Морфология локальных структур в пределах Оленекского поднятия также говорит об определенных обстановках их формирования. Так, например, в центральной и восточной частях локальные поднятия брахиоморфной формы, которые последовательно оконтуривают центральную часть поднятия, имеют при этом относительно симметричное строение. Это, по нашему мнению, связано непосредственно с независимым ростом основного свода, и поэтому обуславливает радиальное распределение 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 (см. рис. 4.3.1), вероятно, заложенные по современным закономерно развитым тектоническим трещинам (мелким разрывам). 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 предполагается, что долина Оленека заложена по новообразованному новейшему сдвигу.

В основании чехла лежат кембрийские отложения, обнажающиеся на левобережье р. Оленек (см. рис. 1.1.1). Над крупными древними Оленекским и Мунским сводами унаследованно развиваются Оленекское и Мунское поднятия; в пределах древнего Лено-Анабарского прогиба образовались Бурская (унаследованная) и Келимьярская впадины, разделенные разрастающимся на новейшем этапе Оленекским сводом; над Кютингдинским грабеном развит одноименный прогиб [Гордеев, 2018].

На северо-западном обрамлении свода, где находится новейшая Бурская впадина, доминируют север-северо-западные и меридиональные оси сжатия и I и II рангов. Остальные направления имеют подчиненное значение (см. рис. 4.3.1). Такой рисунок осей

сжатия, возможно, обусловлен наложением нескольких полей напряжений. В первую очередь, эта область находится под влиянием активно растущего Оленекского поднятия, которое втягивает в поднятие и смежные структуры. Поэтому субмеридиональные оси сжатия, скорее всего, обусловлены влиянием поднятия. С другой стороны, Бурская впадина развивается унаследованно над древним Лено-Анабарским прогибом, т.е. здесь происходит одновременное развитие смежных структур поднятие-впадина, хорошо доказанное Ю.Л. Ребецким по сейсмологическим данным [Ребецкий, 2008]. Это подтверждается возникновением локальных условий дополнительных растяжений.

Кютингдинский новейший прогиб, развивающийся над древним протерозой-мезозойским одноименным грабеном, характеризуется полем напряжения, которое связано с воздыманием Оленекского поднятия. Реконструированные северо-восточные ориентировки осей сжатия это подтверждают, так как они направлены внутрь оси впадины от центральной части Оленекского поднятия.

На территории южной части исследуемого Лено-Оленекского междуречья, которая в новейшей структуре представлена субмеридиональными ступенями, понижающимися с запада и с востока в сторону крупного Ленского прогиба, установлены иные геодинамические обстановки их формирования.

В первую очередь следует отметить, что эту территорию по направлениям определенных здесь осей сжатия можно разделить на две части: западную и восточную. На западе преобладающими являются субмеридиональные оси сжатия I и II рангов, на востоке – оси сжатия имеют, преимущественно, северо-западную ориентировку. Границей этих областей является хорошо выраженный субмеридиональный прогиб, занятый речными долинами Сянгюде и Молодо [Гордеев, 2016а].

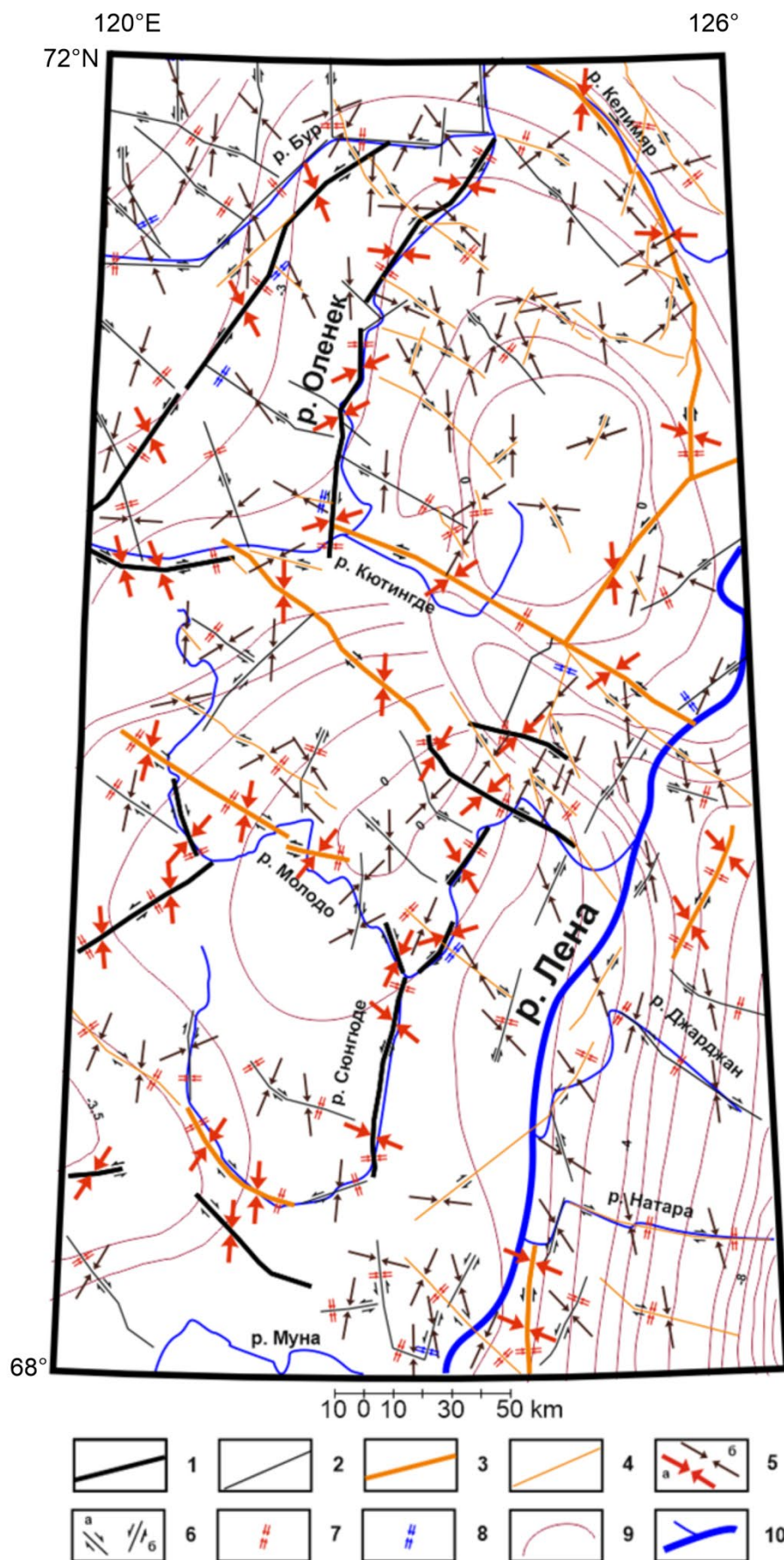


Рис. 4.3.1. Схема новейших напряжений Оленёкского поднятия и его структурного-обрамления.

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.

Для подробного анализа распределения осей сжатия (рис. 4.3.1) построены розы-диаграммы [Гордеев, 2016; 2019]. Оси сжатия первого ранга стремятся принять радиальное положение (рис. 4.3.2 А), однако главный максимум ориентирован субмеридионально; чуть менее выражен северо-западный максимум. Связано такое положение осей со следующими аспектами: 1) с радиальным положением осей сжатия вокруг сводовых поднятий (если исключить субмеридиональное региональное сжатие), 2) с единым полем напряжения на центрально-западную часть, а именно – с субмеридиональным сжатием, 3) с внутренней неоднородностью центрально-западной части (взаимодействие структур низшего ранга поднятие-впадина). Оси сжатия второго ранга (рис. 4.3.2 Б) во многом повторяют распределения осей сжатия первого ранга. Разница наблюдается в более выраженном северо-восточном максимуме, который, вероятно, связан с полями напряжений для структур более высокого ранга. Для анализа осей сжатия 2 ранга необходимо провести исследования более крупного масштаба.

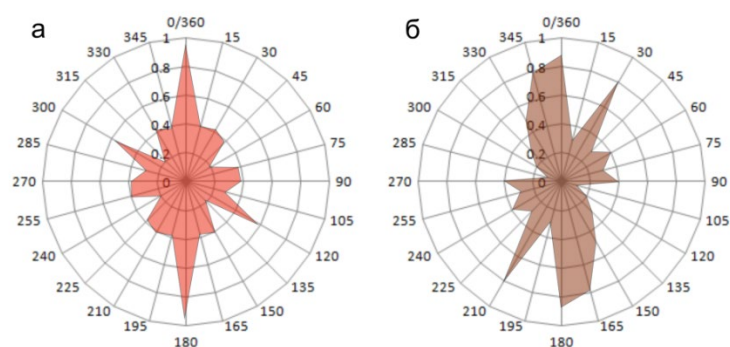


Рис. 4.3.2. Розы-диаграммы по главным осям сжатия на рис. 5: а) первого ранга (39 определений), б) второго ранга (103 определений). Всего 142 определения.

В целом субмеридиональное простираение ступеней-поднятий и Ленского прогиба, их положение, параллельное основной структуре крупнейшего протяженного Верхоянского хребта, расположенного к востоку от исследуемой территории, позволяет сделать предположение об активном влиянии орогенических процессов в пределах хребта на соседние структуры. Этому не противоречат восстановленные поля напряжений, в которых направление сжатия, возможно, обусловлено современным развитием

Верхоянского хребта. Это влияние распространяется, очевидно, далеко на запад. Однако в западной части изучаемого района оно, возможно, накладывается на результаты воздействия других источников, в том числе, и Оленекского поднятия. Последний на севере представляет собой новейший свод, а в юго-западной части исследуемой территории Мунский свод имеет форму, вытянутую в север-северо-восточном направлении. Восточный склон Мунского поднятия поделен на ступени, которые имеют ассиметричное строение, с более крутым западным бортом и пологим восточным склоном. В пределах южного окончания Оленекского поднятия сформировались локальные поднятия северо-западного простираия, ограниченные линеаментами.

Приленское поднятие, Ленский прогиб и все правобережье Лены находится в области непосредственного влияния Верхоянского хребта. Несмотря на это, субмеридионально вытянутые структуры дифференцированы на локальные поднятия и прогибы субширотного и северо-западного простираия, что подтверждается результатами тектонофизического анализа: оси сжатия II ранга ориентированы преимущественно поперек локальных структурных форм [Гордеев, 2018, 2020].

Автор предполагает, что граница восточной и западной области (она же – восточная граница Мунско-Сюгюндинского поднятия) с различными полями напряжения имеет современную тектоническую природу. Она представляет собой зону со сдвиговыми признаками. Коленообразный характер русла р. Молодо, выпуклые к югу дуги рек Сюнгюде и Кюскюрдяи могут быть обусловлены левосдвиговыми неотектоническими деформациями. Возможно, это зона является новообразованным новейшим сдвигом.

При изучении геодинамики района исследований предполагалось наличие признаков внутриплатформенных источников напряжений в структурах северо-востока Сибирской платформы. При этом одной из серьезных проблем 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 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] объясняется 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 к 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, устойчивым воздыманием Оленекского и Мунского поднятий с палеозоя можно объяснить разгрузку «разряжающихся» гравитационных горизонтальных напряжений, которые породы испытывали на глубине. Рост этих поднятий обусловил радиально расходящиеся оси сжатия. Продолжающийся рост Оленекского поднятия вызвал разделение древнего Оленек-Анабарского прогиба на Бурскую и Келимьярскую впадины, а также смещение оси Кютингдинского новейшего прогиба на юго-запад относительно оси Кютингдинского древнего грабена [Сим, Гордеев, Маринин, 2018 ; Сим и др., 2018а; Гордеев, 2020].

Резюмируя все вышесказанное, можно сделать следующие выводы: структурно-геоморфологический метод анализа вторичных нарушений, базирующийся на принципах тектонофизического моделирования [Сим Л.А., 1991], показал, что формирование большинства разломов, независимо от их простирания и ранга, происходит преимущественно в обстановке транспрессии. Обстановки транстенсии крайне редки и характерны лишь для новейших отрицательных структур. Анализ морфологии новейших структур в комплексе с тектонофизическим методом позволил разделить территорию Лено-Оленекского междуречья на несколько областей с разными геодинамическими обстановками формирования структур. Основными источниками, которые влияют на особенности структурного плана территории исследования, являются новейшие активно развивающиеся Оленекское поднятие и Верхоянский хребет. На основании детального анализа линеаментов, проведенного в пределах Оленекского сводового поднятия, установлены основные направления возможного сжатия, что соответствует результатам тектонофизического анализа. Предварительные выводы о геодинамических условиях формирования структур в пределах территории Лено-Оленекского междуречья требуют уточнения на основании более детальных исследований [Гордеев, 2017; Гордеев, 2020; Гордеев, Сим, 2020а].

Выводы. 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 являются **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 была изучена история формирования и развития структуры Оленёкского 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. Всё это в совокупности позволило составить схему геодинамики для территории исследования, где видны общие закономерности по распространению напряжений в областях развития новейших структур (Приложение А).

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 собственном более глобальном источнике напряжений, таком как рассеянный спрединг хребта Гаккеля. Верхоянский хребет испытывает сжатие, ориентированное вкрест простирания. Поле напряжений платформенной области 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.

Были получены следующие результаты и сделаны важные выводы:

1. Для территории исследования выявлены основные новейшие структуры. Неотектонические структурные планы северной и южной части исследуемой территории в значительной степени отличаются. В северной части основной структурой является Оленекское сводовое поднятие, росту и развитию которого подчиняются Келимьярский и Бурский прогибы. На северо-востоке территории выделено новейшее поднятие кряжа Чекановского. В строении южной части установлена субмеридиональная зональность новейших поднятий-ступеней, которые последовательно снижаются с запада и востока к Ленскому прогибу. Новейшие прогибы заняты речными долинами. Они разделяют новейшие поднятия. *Впервые для этой территории построена детальная неотектоническая схема, на которой показаны главнейшие тектонические структуры.*

2. *Впервые для территории Оленекского поднятия и структур его обрамления были созданы 3D модели поверхности осадочного чехла и фундамента,* которые позволили оценить степень унаследования разновозрастных структурных планов.

3. Установлена унаследованность развития новейших, в том числе, современных структур по отношению к более древним. Оленекское сводовое поднятие,

Кютюнгдинский прогиб, Бурская впадина и др. – структуры, которые на протяжении длительной геологической истории развивались унаследовано. Определены инверсионные структуры. Среди них – Верхоянский хребет, Кряж Чекановского, а так же Мунско-Суханское и Сюнгюдинское поднятия и др.

4. Тектоника района рассмотрена с геодинамических позиций. Установлены современные геодинамические условия формирования Оленекского поднятия и структур его обрамления. Анализ морфологии новейших поднятий и прогибов, а также линеаментный анализ в комплексе с тектонофизическим методом позволил на территории исследования выявить различные области с разными геодинамическими обстановками формирования неотектонических структур. Главными источниками, которые определяют особенности структурного плана территории исследования, являются новейшие активно развивающиеся Оленекское и Мунское поднятия и Верхоянский хребет. Область динамического влияния хребта Гаккеля со стороны Сибирской платформы ограничена тектоническим валом и диффузной границей в области шельфа моря Лаптевых и Верхояно-Колымской складчатости. *Впервые была составлена схема геодинамики масштаба 1:1 000 000 на северо-восток Сибирской платформы и структур обрамления.*

Литература

1. Агранов Г.Д., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л. Физическое моделирование формирования микроконтинентов и краевых плато северной Атлантики // 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 : Изд-во ИГУ, 2021. С. 105-106. <https://doi.org/10.26516/978-5-9624-1919-0.2021.1-233>
2. Андиева, Т. А. Тектоническая позиция и основные структуры моря Лаптевых / Т. А. Андиева // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. Т. 3. № 1. С. 6.
3. Борисов О.М., Глух А.К. Кольцевые структуры и линеаменты Средней Азии. Ташкент, Изд-во ФАН, 1982.
4. Виноградов В.А., Драчев С.С. К вопросу о тектонической природе фундамента юго-западной части шельфа моря Лаптевых // Доклады РАН. 2000. Т. 372. № 1. С. 72-74.
5. Галабала О.Р. и др. Неотектоника северо-восточной части Сибирской платформы и ее складчатого обрамления // Вопросы региональной геологии СССР. М.: Недра, 1971. С. 118-129;
6. Галабала Р.О. Карта новейшей тектоники северо-восточной части Сибирской платформы и Верхоянской складчатой области // Тектоника Сибири. Том IV. Тектоника складчатых областей Сибири и Дальнего Востока. Изд-во "Наука". М.: 1970. С. 182-192.
7. Галабала Р.О. Особенности развития новейших структур восточной части Сибирской платформы и ее обрамления // Новейшая тектоника Сибирской платформы и ее влияние на нефтегазоносность. М.: "Наука". 1985. С. 51-56.
8. Геодинамическая карта России. Масштаб 1:10 000 000. В.А.Буш, Л.М. Натапов, 1995
9. Геологическая карта дочетвертичных образований. Масштаб 1 : 1 000 000. Серия Джарджан. Лист R-51. Составитель В.С. Гриненко, Л.А. Юганова, А.М. Трущелев. С-Пб.: ВСЕГЕИ, 2013;
10. Геологическая карта СССР масштаба 1: 200 000. Серия Анабарская. Лист R-51-IX, X. Объяснительная записка. Составитель Н.И. Гогина. М.: Недра, 1975.89 с.;
11. Геологическая карта СССР масштаба 1: 200 000. Нижне-Ленская серия. Лист R-51-V, VI. Объяснительная записка. Составители Д.С. Яшин, Д.А. Вольнов. М.: Недра, 1965. 49 с.;
12. Гзовский М.В. Основы тектонофизики / Гзовский М.В. М.: Наука. 1975. 536 с.;

13. Гзовский М.В. Тектонические поля напряжений // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1954. – № 5. С. 390-410.
14. Гончаров М.А. Инверсия плотности в земной коре и складкообразование. М.: Недра, 1979. 246 с.
15. Гончаров М.А. Механизм геосинклинального складкообразования. М.: Недра, 1988.
16. Горнштейн Д.К., Мокшанцев К.Б., Петров А.Ф. Разломы восточной части Сибирской платформы // Разломная тектоника территории Якутской АССР. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1976. С. 10–63.
17. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Серия Джарджан. Лист R-51. Объяснительная записка. Составитель В.С. Гриненко, Л.А. Юганова, А.М. Трущелев. С-Пб.: ВСЕГЕИ, 2013;
18. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1 000 000 (третье поколение). Серия ВерхояноКолымская. Лист Q-52– Верхоянские цепи. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 335 с. + 6 вкл. (Минприроды России, Роснедра, ФГУП «ВСЕГЕИ», ГУП РС (Я) «ЯПСЭ»).
19. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200000, 1960;
20. Граханов С.А. Особенности формирования и закономерности размещения россыпей алмазов северо-востока Сибирской платформы Автореферат дисс. на соиск. уч. степени доктора геол.-минер. н. Якутск, 2007;
21. Граханов С.А., Рэтские россыпи алмазов, 2010
22. Грачев А.Ф., Основные Проблемы Новейшей Тектоники И Геодинамики Северной Евразии//Физика Земли. №12. Москва. 1996. с. 5-36;
23. Гусев Е.А., Зайончек А.В., Мэннис М.В., Рекант П.В., Рудой А.С., Рыбаков К.С., Черных А.А. Прилаптевоморское окончание хребта Гаккеля // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб, ВНИИ Океангеология, 2002. Вып. 4. С. 40-54..
24. Драчев С.С. Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // Геотектоника. 2000. №6. С. 43-58.
25. Дубинин Е.П. Слоисто-блоковое строение океанической литосферы // 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 : Изд-во ИГУ, 2021. С. 27-28. <https://doi.org/10.26516/978-5-9624-1919-0.2021.1-233>

26. Заварзина Г.А., Шкарубо С.И. Тектоника западной части шельфа моря Лаптевых // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7. №3. С. 1-18.
27. Израилев Л.М., Кац А.Г., Флорова З.Б. и др. Отчет по групповой геологической съемке масштаба 1 : 50 000 в пределах листов К-51-55-59, 1981-1985 гг. - М., 1986.
28. Имаев В.С. и др. Напряженно-деформированное состояние Земной коры в зоне перехода океан – континент арктической части Якутии//Интерэкспо Гео-Сибирь, 1998, №?, с. 14-18.
29. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмотектоника Якутии. М.: ГЕОС. 2000. С. 227.
30. Имаева Л.П. и др. Динамика и сейсмотектонические деформации структурно-тектонических границ арктического сектора Арктико-Азиатского сейсмического пояса//Материалы IV тектонофизической конференции, 2016, Т1, с.234-241;
31. Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С. Динамика рельефа и сейсмотектоническая активизация новейших структур дельты р. Лена // ГЕОТЕКТОНИКА. 2019. No 5. С. 62-77.
32. Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С., Ашурков С.В., Мельникова В.И., Середкина А.И. Геодинамическая активность новейших структур и поля тектонических напряжений северо-востока Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2017 Т. 8. № 4. С. 737–768. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0315.
33. Карта новейшей тектоники Северной Евразии: м-б 1:5 000 000 / гл. ред А.Ф. Грачев; Мин-во природных ресурсов России. М.: ОИФЗ РАН, 1997.
34. Карта поверхностей выравнивания и кор выветривания СССР. Масштаб 1 : 2 500 000. – М.: ВСЕГЕИ. 1972.
35. Ким Б.И. История развития Лаптевского шельфа и палеошельфа в кайнозой // Кайнозой шельфа и островов Советской Арктики. Л., Изд-во ПГО «Севморгеология». 1986. с. 119-123.
36. Ким Б.И., Рейнин И.В. Новейшая тектоника Лено-Анабарского прогиба и ее влияние на нефтегазоносность // Новейшая тектоника Сибирской платформы и ее влияние на нефтегазоносность. М.: "Наука". 1985. С. 84-87.
37. Конторович В.А. и др. Структурно-тектоническая характеристика и модель геологического строения неопротерозойско фанерозойских отложений Анабаро-Ленской зоны // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 8. С. 1253-1274.
38. Костенко Н.П., Макарова Н.В., Корчуганова Н.И. Выражение в рельефе складчатых и разрывных деформаций. Структурно-геоморфологическое дешифрирование

- аэрофотоснимков, космических снимков и топографических карт. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1999. 118 с.
39. Лобковский Л.И. Тектоника деформируемых литосферных плит и модель региональной геодинамики применительно к Арктике и северо-восточной Азии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3. С. 476-495.
 40. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Науч. мир, 2004. 610 с.
 41. М. Д. Томшин, А. В. Округин, А. И. Зайцев, В. П. Серов. Погребенный Мунский массив докембрийских щелочных базитов (северо-восточная часть Сибирской платформы) // Отечественная геология. 2007. № 5. С. 83-90.
 42. Макаров В.И. Линеаменты (проблемы и направления исследований с помощью аэрокосмических средств и методов). // Исследование Земли из космоса, 1981, №4, с. 109-115.
 43. Макаров В.И. Некоторые проблемы изучения новейшей тектоники платформенных территорий (на примере Русской плиты) // Разведка и охрана недр. 1997. №1. С. 20-26.
 44. Макарова Н.В., Суханова Т.В. Геоморфология : учебное пособие / отв. ред. В.И. Макаров, Н.В. Короновский. – 2-е изд. – М. : КДУ, 2009. 414 с.
 45. Межвилк А.А. Ленский структурный шов // Тектоника Сибири. Том IV. Тектоника складчатых областей Сибири и Дальнего Востока. Изд-во "Наука". М.: 1970. С. 53-60.
 46. Мигурский, Ф. А. Новые данные о геологическом строении Кютингдинского грабена (Северо-Восток Сибирской платформы) / Ф. А. Мигурский, Е. М. Якупова // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 6. – С. 10-17.
 47. Милановский Е.Е. Геология России и ближнего зарубежья (Северной Евразии). Учебник. Изд.: М.: Изд-во МГУ. 1996. С. 448;
 48. Михайлова А.В. Геодинамические характеристики структур, образовавшихся в слое над активными разломами фундамента (по данным тектонофизического моделирования) // Геофизика XXI столетия: 2006 год : сб. трудов Восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского, 2-4 марта 2006, Москва. – М. : ИНТЕКГЕОН ; ГЕРС, 2007. С. 111-118.
 49. Михайлова А.В. Исследование механизмов формирования тектонических структур в слое над активными разломами фундамента в свете учения М.В. Гзовского // Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 212–224.

50. Николаев Н.И., Карта новейшей тектоники СССР и сопредельных областей. М.: Мингео СССР, 1979.
51. Новейшая тектоника Северной Евразии: Объяснит. записка к карте новейшей тектоники Северной Евразии м-ба 1:5 000 000. М.: ГЕОС, 1998. 147 с.
52. Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии / ред. А.Ф. Грачев. М.: 2000. 487 с.
53. Объяснительная записка к сдвоенному листу R-51-V, VI Госгеолкарты СССР масштаба 1:200000, 1960;
54. Объяснительная записка к сдвоенному листу R-52 – Тикси. Госгеолкарты РФ масштаба 1:1000000 (третье поколение), 2016;
55. Объяснительная записка к сдвоенному листу S-51-52 (Оленёкский зал. и дельта р. Лена). Госгеолкарты РФ масштаба 1:1000000 (третье поколение), 2014;
56. Объяснительная записка. Лист R-(50)-52 — Тикси. Геологическая карта СССР масштаба 1:1000000 (новая серия). Л., 1983, с. 135 (Министерство геологии СССР, ВСЕГЕИ).
57. Полетаев А.И. Линеаментный метод // Экологический вестник. 2001. № 3. С. 12-28.
58. Полькин Я.И., Гапоненко Г.И. Тектоника Арктического шельфа, прилегающих частей акватории Северного Ледовитого океана и территории Восточной Сибири // Тектоника Сибири. Том IV. Тектоника складчатых областей Сибири и Дальнего Востока. Изд-во "Наука". М.: 1970. С. 46-53.
59. Поляков А.А., Блинова В.Н., Каширцева В.А., Смирнова М.Е., Новые данные о геологическом строении Оленекского месторождения битумов и перспективах нефтегазоносности прилегающей территории//Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. Т.6. №3;
60. Пуминов А.П., К истории речных долин в низовьях рек Лены и Оленек Труды НИИГА Том 114, 1960, вып. 14, с. 163-172;
61. Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние слоя при продольном горизонтальном сдвиге блоков его фундамента // Поля напряжений и деформаций в земной коре. – М. : Наука, 1987. – С. 4-56
62. Ребецкий Ю.Л. О возможном механизме генерации в земной коре горизонтальных сжимающих напряжений // Докл. АН. 2008. Т. 423, № 4. С. 538–542.
63. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Козырев А.А. О возможном механизме генерации избыточного горизонтального сжатия рудных узлов Кольского полуострова (Хибины, Ловозеро, Ковдор) // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59, № 4. С. 263– 280. [Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Kozyrev A.A. Possible mechanism of horizontal

- overpressure generation of the Khibiny, Lovozero, and Kovdor ore clusters on the Kola Peninsula // *Geology of Ore Deposits*, 59(4): 265-280. <https://doi.org/10.1134/s1075701517040043>
64. Региональная геология: Учебное пособие по курсу «Региональная геология» («Геология России»). Часть 1 Древние платформы / Сост. В.С.Полянин. – Казань: Казанский университет, 2014. 84 с.
 65. Савостин Л.А., Карасик А.М., Зоненшайн Л.П. История раскрытия Евразийского бассейна Арктики // Доклады АН СССР. 1984. Том 275. №5. С. 1156-1161.
 66. Сакс В.Н. Четвертичное оледенение севера Сибири // *Природа*. 1947. №4. С. 16-25.
 67. Сим Л.А. Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. – М. : Наука, 2000. – С. 326-350.
 68. Сим Л.А. Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации). Изв. вузов. геол. и разв. / Сим Л.А. 1991. №10. С. 3-22.
 69. Сим Л.А. О связи объема осадконакопления в бассейнах обрамления с величиной эрозионного сноса с Фенноскандинавского щита в мезокайнозой // *Материалы XLIV Тектон. совещ.* М.: ГЕОС, 2012. С. 398–401.
 70. Сим Л.А. Полевые методы реконструкции тектонических напряжений // *Современная тектонофизика: методы и результаты: Материалы 1-й молодеж. тектонофиз. школы-сем., 21–24 сент. 2009, ИФЗ РАН, Москва. М., 2011. С. 277–287.*
 71. Сим Л.А. Применение полевых методов реконструкции тектонических напряжений по данным о разрывах для решения теоретических и практических задач // *Современная тектонофизика. Методы и результаты : мат-лы Второй молодежной тектонофиз. школы-семинара, 17-21 окт. 2011 г., ИФЗ РАН, г. Москва. – М. : ИФЗ РАН. – Т. 2: Лекции. 2011а. С. 156-171.*
 72. Тимурзиев А. И., Гогоненков Г. Н. Новейшая сдвиговая тектоника осадочных бассейнов: от нефтегазогеологического районирования недр до технологии поисков и разведки глубокозалегающих месторождений углеводородов // *Вести газовой науки*. 2012. №1 (9).
 73. Трещиноватость горных пород. Основы теории и методы изучения: / метод. Еком./ Сост.: О.Г. Епифанцев, Н.С. Плетенчук; СибГИУ. Новокузнецк, 2008. Т 66. 41 с.
 74. Хаин В.Е. Тектоника океанов и континентов (год 2000). М.: Научный мир, 2001. 606 с.

75. Шерман С.И., Семинский К.Ж. Тектонофизические исследования в институте Земной коры СО РАН: принципиальные достижения и актуальные задачи // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 1. Р. 4–23.
76. Drachev S.S., Kaul N., Beliaev V.N. Eurasia spreading basin to Laptev Shelf transition: structural pattern and heat flow // *Geophys. J. Int.* 2003. V. 152. P. 688–698.
77. Engen Ø., Eldholm O. The Arctic plate boundary // *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*. 2003. V. 108, (B2). P. 2075. doi:10.1029/2002JB001809.
78. Franke Dieter, Hinz Karl, Block Martin, Drachev Sergei S., Neben Sänke, Kos'ko Michail K., Reichert Christian and Roeser Hans A. Tectonics of the Laptev Sea Region in North-Eastern Siberia // *Polarforschung*. 1998. V. 68. P. 51-58.
79. Fujita Kazuya , F. William Cambray and Michael A. Velbel Tectonics of the Laptev Sea and Moma Rift Systems, Northeastern USSR // *Marine Geology*. 1990. V. 93. P. 95-118.
80. Gersztenkorn A., Marfurt K.J. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping. *Geophysics*, 64, no. 5, p. 1468–1479, 1999.
81. Grachev A.F. The Arctic rift system and the boundary between the Eurasian and North American lithospheric plates: New insight to plate tectonic theory // *RUSSIAN JOURNAL OF EARTH SCIENCES*. 2003. V. 5, (5). P. 307-345.
82. Hindle D., Mackey K. Earthquake recurrence and magnitude and seismic deformation of the northwestern Okhotsk plate, northeast Russia // *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*. 2011. V. 116, B02301. doi:10.1029/2010JB007409.
83. Imaeva L., Gusev G., Imaev V., Mel'nikova V. Neotectonic activity and parameters of seismotectonic deformations of seismic belts in Northeast Asia // *Journal of Asian Earth Sciences*. V. 148. 2017. P. 254-264.
84. Kass M. et.al. Snakes: Active contour models. *International Journal of Computer Vision*. – 1988. – V. 1 (4). – 321-331.
85. Marfurt K., et.al. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm. *Geophysics*, 63, no. 4, p. 1150–1165, 1998.
86. Masoud A., Koike K. Applicability of computeraided comprehensive tool (LINDA: LINEament Detection and Analysis) and shaded digital elevation model for characterizing and interpreting morphotectonic features from lineaments [Electronic resource] // *Computers & Geosciences*. – 2017. – V. 106. – P. 89-100). – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2017.06.006> (date of access: 12.09.2018).
87. Ollier C.D., Pain C.F. Neotectonic mountain uplift and geomorphology // *Геоморфология*. 2019. №4. С. 3-26. <https://doi.org/10.31857/S0435-4281201943-26>.

88. Randen T., et.al. Three-dimensional texture attributes for seismic data analysis. 70th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, p. 668–671, 2000.
89. Rebetsky Y.L. Possible mechanism of horizontal compression stress generation in the Earth's crust // *Doklady Earth Sciences*. 2008. V. 423, (2). P. 1448-1451. doi.org/10.1134/S1028334X08090274.
90. Rebetsky Y.L., Sim L.A., Kozyrev A.A. Possible mechanism of horizontal overpressure generation of the Khibiny, Lovozero, and Kovdor ore clusters on the Kola Peninsula // *Geology of Ore Deposits*. 2017. V. 59, (4). P. 265-280. doi.org/10.1134/S1075701517040043.
91. Suzuki S., Abe K. Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following. *CVGIP*, 30, 1, p. 32-46, 1985.
92. von Gioi R.G., et.al. LSD: a Line Segment Detector. *Image Processing On Line*, [2](#) (2012), p. 35–55.
93. Zlatopolsky A. Program LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis). Automated linear image features analysis – experimental results. *Computers & Geosciences*. – 1992. – V. 18, No. 9. – P. 1121-1126.
94. Zlatopolsky A. WinLESSA. Version 3.1. User guide, 2008
95. Zoback M.L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the World Stress Map Project // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97, N B8. P. 11703–11728. <https://doi.org/10.1029/92jb00132>

Фондовые материалы:

96. Алексеев В. В., Зимин Л. А., Зими́на Р. П. Геолого-геоморфологический очерк и перспективы бассейнов рек Куойка, Беенчимэ, Келимер и Приморской низменности (отчет партии № 247 за 1958 г). - Пос. Айхал, 1958ф;
97. Галабала Р. О. (отв. исп.). Геологическое строение и полезные ископаемые междуречья Лены и Оленека. Отчет партии № 14 об АФГК масштаба 1 : 50 000 на площади листов К-51-19-24, 36, 48; К-52-13, 14, 25, 26, 37-39, проведенном в 1988-1992 гг - М., 1992;
98. Граханов С.А. Отчет о результатах прогнозно-поисковых работ на коренные месторождения алмазов в пределах Оленёкского поднятия (Республика Саха (Якутия)) в 2007-2010, ф;
99. Кривонос В. Ф., Федоров П. Т. Отчет о результатах геолого-поисковых работ на алмазы Приленской партии в бассейнах рек Молодо, Муна и Арга-Тюнг за 1967 год. 1968.

Интернет источники:

- 100. www.neotec.ginras.ru
- 101. geodisaster.ru
- 102. <https://yandex.ru/maps>
- 103. www.google.com/Google Планета Земля
- 104. www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en

Публикации автора:**Статьи в научных журналах:**

- 105. **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).
- 106. 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).
- 107. 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.):

- 108. 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:

- 109. **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.
- 110. **Гордеев Н.А.** Тектонофизический анализ линеаментов Оленекского поднятия // Четвертая тектонофизическая конференция. Т. 1. ИФЗ РАН ИФЗ РАН, 2016. С. 48-52.

111. **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.
112. **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 - Наукам о Земле. Т.1 из *Новые идеи в науках о Земле*. Издательство РГГУ им. С. Орджоникидзе. 2020. С. 10-14.
113. **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. Николая Павловича Лавёрова. Архангельск.: 2020а. С. 226-231.
114. **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.
115. Молчанов А.Б., **Гордеев Н.А.** О применении алгоритмов компьютерного зрения в тектонофизике // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. (в печати)
116. 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.
117. Сим Л.А., **Гордеев Н.А.** О рифтогенезе хребта Гаккеля на Лапетвоморском 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>

118. 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 I Тектонического совещания. Т. 2. ГЕОС, М., 2018. С. 181-184.
119. 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. 2018а. С. 331-334. DOI: [10.31241/FNS.2018.15.082](https://doi.org/10.31241/FNS.2018.15.082)
120. 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.
121. Суханова Т.В., Макарова Н.В., **Гордеев Н.А.**, Бондарь И.В. Новейшая тектоника Оленек-Келимьарского 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.

Тезисы докладов:

122. **Гордеев Н.А.**, Сим Л.А., Суханова Т.В., Бондарь И.В. Взаимосвязь неотектоники и полезных ископаемых района Оленекского поднятия // 5-ая Международная конференция Триггерные эффекты в геосистемах. Тезисы докладов. ИДГ РАН. Москва (Россия), 4-7 июня 2019 г. Институт динамики геосфер РАН г. Москва, 2019. С. 53-54.
123. **Гордеев Н. А.** Новейшая структура и эволюция Оленёкского поднятия и его южного обрамления (Восточная Сибирь) // Научная конференция молодых учёных и аспирантов. 24-25 апреля 2017 г. ИФЗ РАН. ИФЗ РАН, 2017.
124. **Гордеев Н.А.** Взаимосвязь напряженно-деформированного состояния новейших структур Северо-востока Восточно-Сибирской платформы и ПИ // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2019 / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс]. Москва: Москва, 2019.
125. **Гордеев Н.А.** Новейшая структура и эволюция развития Оленёкского поднятия (Восточная Сибирь) // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН 25-26 апреля 2016 г. Тезисы и программа Конференции. ИФЗ РАН М, 2016а. С. 25-26.

126. **Гордеев Н.А.** Результаты исследования неотектоники и геодинамики северо-востока Восточно-Сибирской платформы за период 2014-2018 гг. Москва. 23 и 24 апреля 2018г // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН 23 и 24 апреля 2018 г. ИФЗ РАН, Москва, 2018а.
127. **Гордеев Н.А.** Характер напряженно-деформированного состояния и источники его формирования на территории Лаптевоморского региона, северо-восточная часть Сибирской платформы // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, 28-29 октября 2020 г. Тезисы докладов и программа конференции. Перо. Москва, 2020. С. 21.
128. **Гордеев Н.А.** Цветковая структура Прилаптевоморского региона (Кряж Чекановского) // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2021 / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, Е.И. Зимакова. [Электронный ресурс]. Москва: Москва, 2021.
129. **Гордеев Н.А., Молчанов А.Б.** Решение задачи определения неотектонических напряжений в пределах разрывных структур при помощи алгоритмов компьютерного зрения // Сборник тезисов XXV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. ЛОМОНОСОВ - 2018. МГУ имени Ломоносова Москва, 2018.
130. **Гордеев Н.А., Молчанов А.Б.** Решение задачи по автоматизации структурно-геоморфологического метода реконструкции неотектонических напряжений Л.А. Сим // Современные исследования в геологии. Сборник тезисов докладов Молодежной научно-практической конференции и XVI конференции студенческого научного общества. СПб.: Изд-во ВВМ, 2018а. С. 207.
131. **Гордеев Н.А., Сим Л. А.** Геодинамические условия формирования новейших структур на северо-востоке Сибирской платформы // Пятая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. "Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле". Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием / Под ред. Р. С. Алексеев, И. В. Бондарь, Н. А. Гордеев и др. М.: М., 2020б. С. 378-383.
132. **Гордеев Н.А., Сим Л.А.** Комплексный подход изучения новейшей геодинамики, основанный на геологических и тектонофизических методах // Воздействие внешних полей на сейсмический режим и мониторинг их проявлений: Тезисы докладов Международной Юбилейной научной конференции. г. Бишкек, Кыргызстан, 2018. С. 292.

133. **Гордеев Н.А.**, Сим Л.А. Новейшая геодинамика северо-востока Восточно-Сибирской Платформы и взаимосвязь с ПИ // Тезисы докладов XIV Международной научно-практической конференции Новые идеи в науках о Земле. Т. 1. МГРИ-РГГРУ Москва, 2019а. С. 27-29.
134. **Гордеев Н.А.**, Сим Л.А. Новые данные о напряженном состоянии северо-восточной окраины Сибирской платформы // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, 22-23 апреля 2019 г. Тезисы докладов и программа Конференции. ИФЗ РАН М, 2019б. С. 29.
135. Молчанов А.Б., **Гордеев Н.А.** Автоматизация СГМ метода реконструкции неотектонических напряжений Л.А. Сим на примере Лено-Оленёцкого междуречья // Триггерные эффекты в геосистемах: тезисы докладов V-й Международной конференции, Москва, 4-7 июня 2019 г. ГЕОС, М.: 2019а. С. 132-133.
136. Молчанов А.Б., **Гордеев Н.А.** Применение алгоритмов компьютерного зрения для автоматизации структурно-геоморфологического метода реконструкции неотектонических напряжений Л.А. Сим // VIII Российская молодежная научно-практическая Школа с международным участием Новое в познании процессов рудообразования. 26 - 30 ноября 2018. ИГЕМ РАН, 2018. С. 445.
137. Молчанов А.Б., **Гордеев Н.А.** Фильтрация ложных линеаментов при реконструкции сдвиговых тектонических напряжений в ПО Sim-SGM // Пятая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. "Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле". Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием / Под ред. Р. С. Алексеев, И. В. Бондарь, Н. А. Гордеев и др. М.: М., 2020. С. 116-118.

Приложение

Приложение А

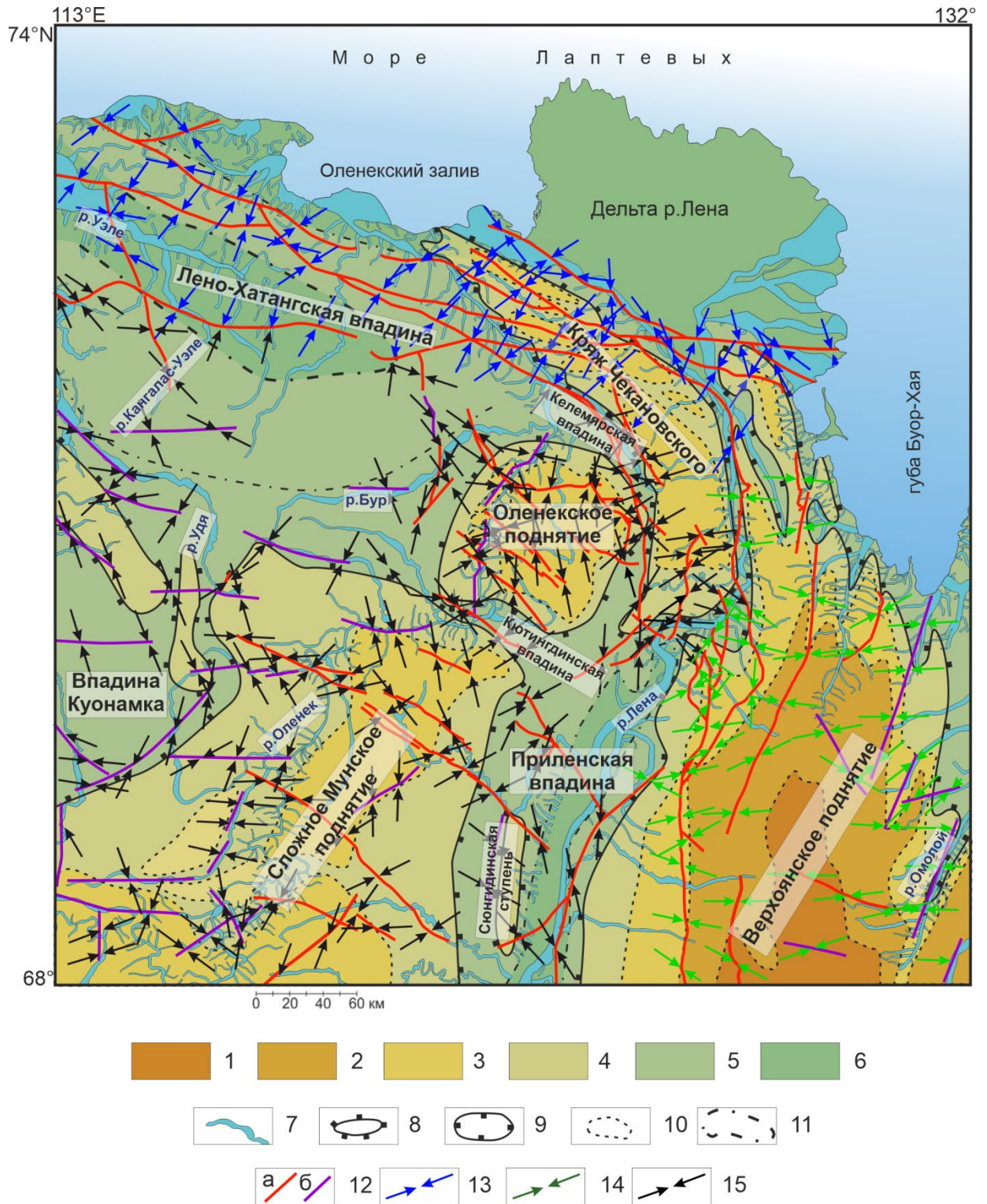
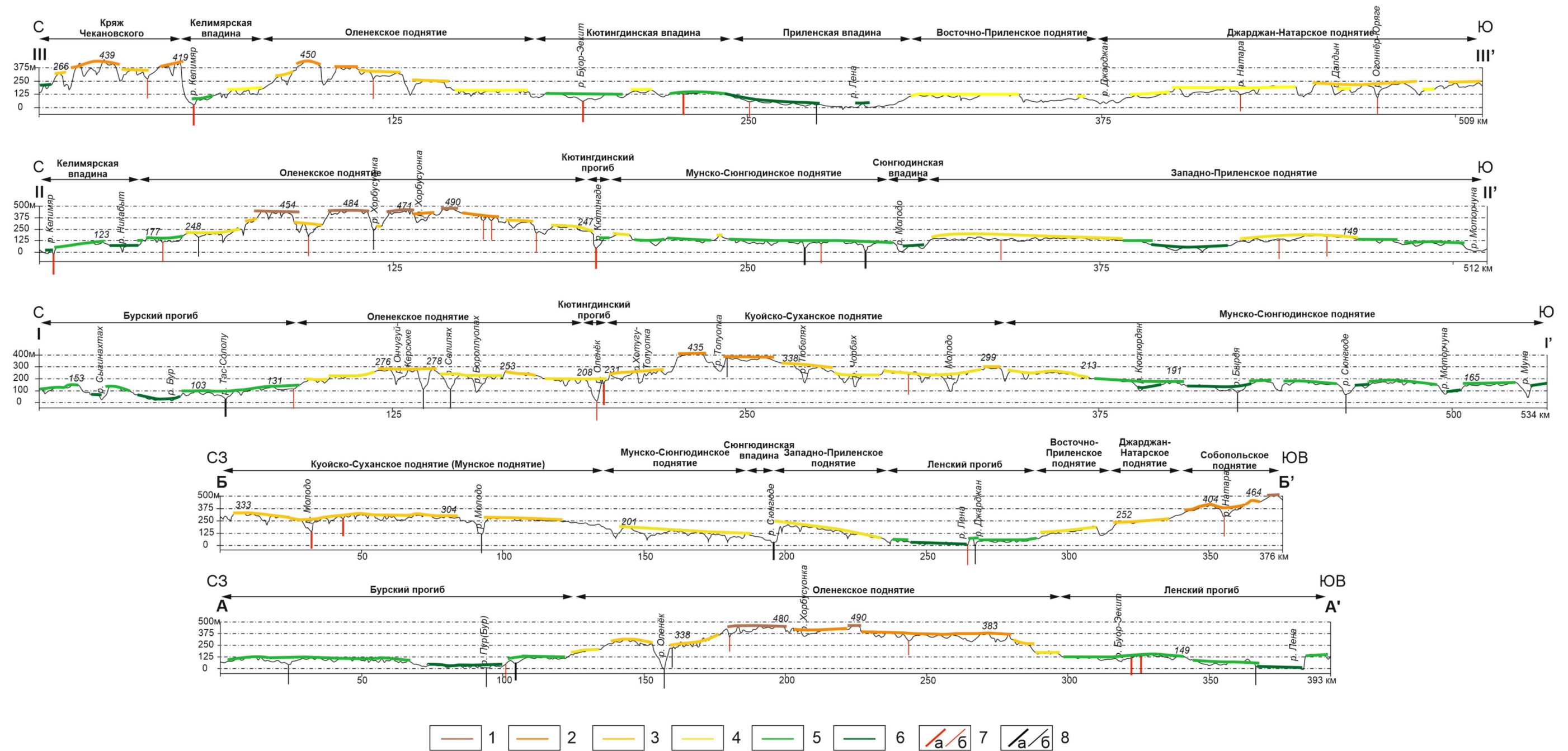


Схема новейшей геодинамики Лено-Оленокского междуречья и структур его обрамления масштаба 1:1 000 000. 1-6 – амплитуды новейших движений: 1 – 900->1500 м; 2 – 450-900 м; 3 – 350-450 м; 4 – 250-350 м; 5 – 150-250 м; 6 – 10-150 м; 7 – долины крупных рек; 8-11 – новейшие структуры: 8 – основные поднятия; 9 – впадины; 10 – локальные поднятия; 11 – изогипсы впадин; 12 – дизъюнктивные структуры: а) по геологическим данным [ГТК, R-

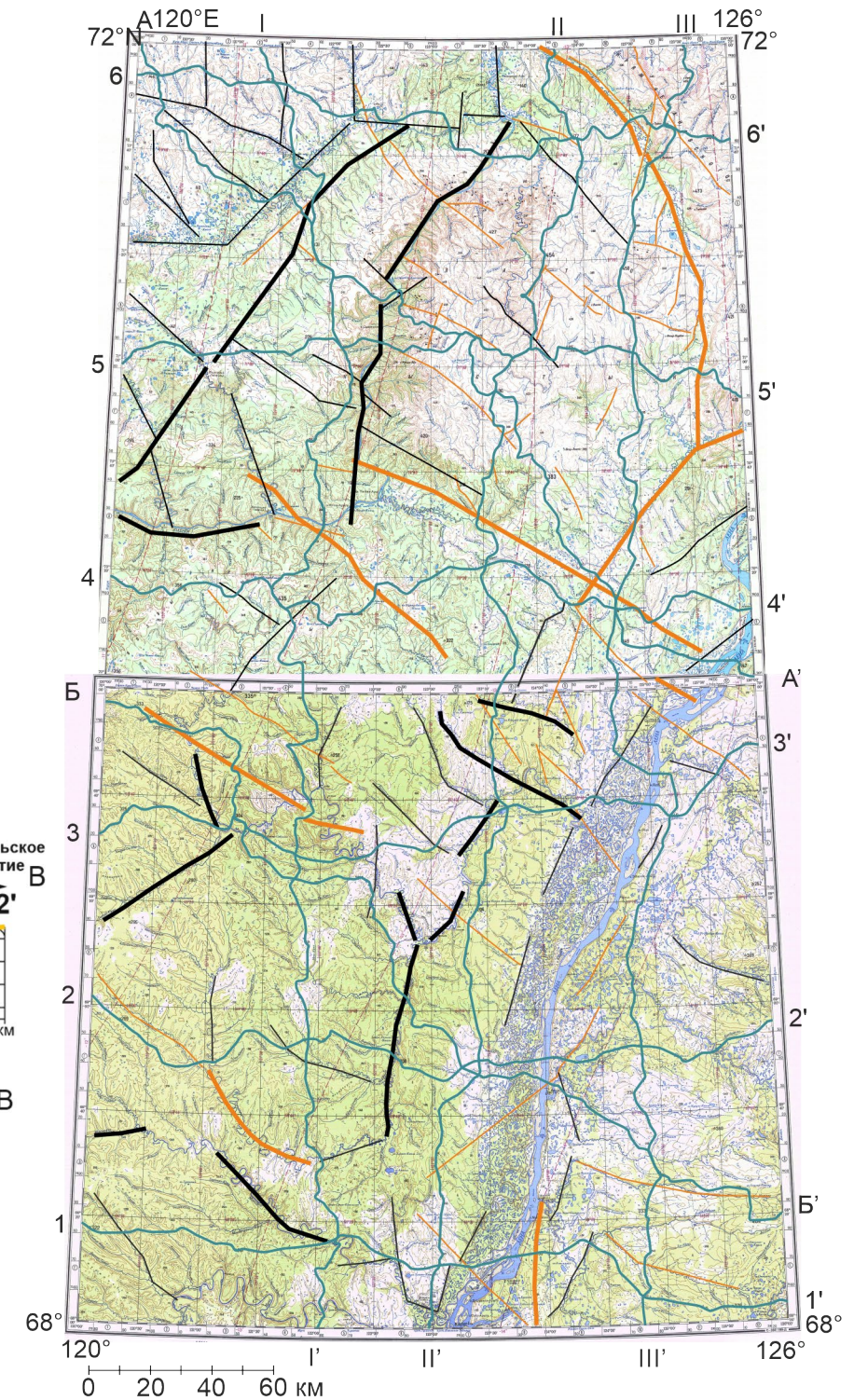
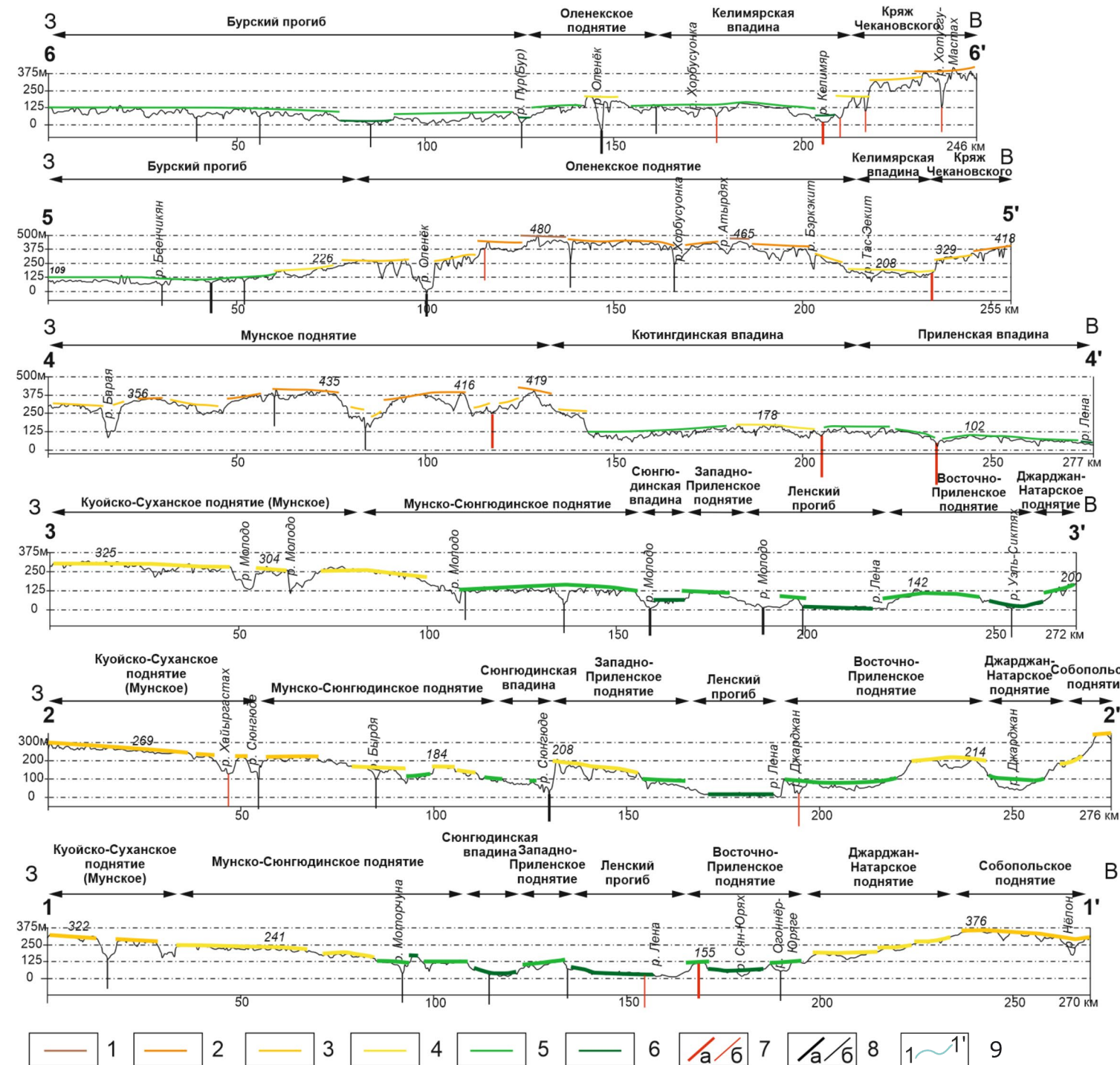
(50)-52, 1975; ГГК, S-50, S-51, S-52, 2011; ГГК, R-51, 2013; ГГК, R-52, 2015], б) дешифрованные линеаменты с восстановленными направлением сдвига и простиранием сжатия; 13 – оси сжатия на Лаптевоморскую область; 14 – оси сжатия на Верхоянскую область; 15 – оси сжатия на объединенную центральную и западную области.

Приложение Б¹



Геоморфологические профили по центральной части исследуемой территории. Горизонтальный масштаб 1:500 000. Составили Н.А. Гордеев, Т.В. Суханова.

1-5 – разновысотные поверхности выравнивания (не расчлененные по возрасту): 1 – 450-500 м; 2 – 350-450 м; 3 – 250-350 м; 4 – 150-250 м; 5 – 10-150 м; 6 – русло и пойма рек; 7-8 – разрывные нарушения по разным данным: 7 – разрывы по [ГТК, R-(50)-52, 1983; ГТК, R-51, 2013]: а) первого ранга, б) второго ранга; 8 – дешифрованные разрывы: а) первого ранга, б) второго ранга.

Приложение Б²

Геоморфологические профили по центральной части исследуемой территории. Горизонтальный масштаб 1:500 000. Составили Н.А. Гордеев, Т.В. Суханова.

1-5 – разновысотные поверхности выравнивания (не расчлененные по возрасту): 1 – 450-500 м; 2 – 350-450 м; 3 – 250-350 м; 4 – 150-250 м; 5 – 10-150 м; 6 – русло и пойма рек; 7-8 – разрывные нарушения по разным данным: 7 – разрывы по [ГТК, R-(50)-52, 1983; ГТК, R-51, 2013]: а) первого ранга, б) второго ранга; 8 – дешифрованные разрывы: а) первого ранга, б) второго ранга; 9 – геоморфологические профили.