

На правах рукописи



МОСКАЛЕНКО Артем Николаевич

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-  
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ  
МОВ ОГТ ЗД НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ НЮРОЛЬСКОЙ  
ВПАДИНЫ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ) И СЕВЕРНОГО СКЛОНА  
БАЙКИТСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)**

специальность 25.00.03 - Геотектоника и геодинамика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Санкт-Петербург  
2018

Работа выполнена в отделе Литогеодинимики и минерагении осадочных бассейнов Федерального государственного бюджетного учреждения Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук,  
профессор кафедры региональной геологии  
Института наук о Земле Санкт-Петербургского  
государственного университета  
**Худолей Андрей Константинович**

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,  
заместитель генерального директора по  
региональной геологии  
и геолого-разведочным работам,  
ООО «НК «Роснефть» - НТЦ»  
**Гайдук Виктор Владимирович**

доктор геолого-минералогических наук,  
заведующий кафедрой литологии  
Российского государственного университета  
нефти и газа им. И.М. Губкина,  
**Постников Александр Васильевич**

Ведущая организация: Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
**Институт геологии алмаза и благородных  
металлов СО РАН**  
(г. Якутск)

Защита состоится 29 марта 2018 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.001.01 при Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, конференц-зал.

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

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

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018  
г. Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат геолого-минералогических наук



Камзолкин В.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Реконструкция параметров напряженно-деформированного состояния является важным аспектом при изучении геологических объектов, построении геодинамических моделей исследуемых регионов, а также моделей трещиноватых коллекторов жидких углеводородов, характеризующихся низкой проницаемостью горных пород (Сим, 1979; Gartrell, Lisk, 2005; Morris, Ferrill, 2009; Ребецкий и др., 2013; Сим и др., 2014; Hashimoto et al., 2014; Маринин, Сим, 2015; Xu et al., 2016; Ferrill et al., 2017 и др.). На сегодняшний день существует большое число методов реконструкции параметров напряженного состояния по структурно-геологическим данным на дневной поверхности, данным о механизмах очагов землетрясений, а также геофизическим данным при изучении скважин (Becker, 1893; Anderson, 1905; Гзовский, 1956; Балакина, 1962; Гущенко, 1973; Гзовский, 1975; Николаев, 1977; Angelier, Mechler, 1977; Engelder, 1980; Расцветаев, 1982; Парфенов, 1981, 1984; Шерман, Днепровский 1989; Уемура, Мицутани, 1990; Сим, 1991; Ребецкий, 1997, 2007; Zoback, 2010; Allmendinger et al., 2012; Rebetsky, 2016 и др.). Однако, существует относительно небольшое количество исследований, посвященных нетрадиционным методам изучения напряженного состояния земной коры по косвенным данным (Сим, 1996; Gartrell, Lisk, 2005), что наиболее актуально для геологических объектов, располагающихся в сейсмически малоактивных зонах и/или характеризующихся отсутствием природных обнажений на поверхности, а также отсутствием возможности проведения дорогостоящих буровых работ для дальнейших геофизических исследований скважин.

В настоящей работе представлен структурно-геологический подход определения индикатора напряженно-деформированного состояния, выделенного при анализе сейсмических данных МОВ ОГТ ЗД. Данный подход основан на анализе структурных карт поверхностей сейсмических горизонтов и приуроченных к ним поверхностей разрывных нарушений, где искомым индикатором тектонического напряжения выступает вектор перемещения по разлому, имеющий количественные характеристики (Москаленко и др., 2015, 2017). Объектом исследования послужили юго-восточная часть Нюрольской впадины Западно-Сибирской плиты (Арчинский объект) и северный склон Байкитской антеклизы Сибирской платформы (Куюмбинский объект), характеризующиеся различными геодинамическими обстановками. Проведенные исследования содержат новые результаты о разломной тектонике и параметрах напряженно-деформированного состояния исследуемых регионов.

### Цель и задачи работы

Целью настоящей работы является разработка подхода выделения нового индикатора тектонического напряжения – вектора перемещения по сейсмическим данным МОВ ОГТ ЗД, для последующего определения кинематических характеристик разломов и реконструкции параметров напряженно-деформированного состояния на Арчинском и Куюмбинском объектах.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать алгоритм выделения вектора перемещения по разрывному нарушению при анализе структурных карт поверхностей сейсмических горизонтов МОВ ОГТ ЗД.
2. Разработать критерии контроля достоверности выделяемых векторов перемещения.
3. Собрать и проанализировать опубликованную литературу по геологическому строению и тектонической эволюции Арчинского и Куюмбинского объектов.
4. Провести анализ кинематических характеристик разрывных нарушений, выделяемых на структурных картах сейсмических горизонтов, реконструкцию параметров напряженно-

деформированного состояния с последующим выделением этапов деформаций, а также обобщить полученные данные и построить модели геодинамической эволюции Арчинского и Куюмбинского объектов.

5. Выделить перспективную область для проведения дальнейших буровых работ и поиска трещиноватых коллекторов нефти на Куюмбинском объекте.

#### **Научная новизна**

На основе результатов анализа кинематических характеристик разрывных нарушений и реконструкции параметров напряженно-деформированного состояния разработанным подходом (1) предложена модель тектонической эволюции Нюрольской впадины с выделением рифтогенеза в раннем - среднем триасе и позднем триасе - ранней юре, сдвиговых деформаций в ранней - средней юре, неотектонических и современных сдвиговых деформаций; (2) установлено наличие двух этапов сдвиговых деформаций в ходе предвендской складчатости Байкитской антеклизы Сибирской платформы, а также получен новый фактический материал о разломной тектонике исследуемого региона и (3) выделена перспективная область для проведения буровых работ и поиска трещиноватых коллекторов нефти на Куюмбинском объекте.

#### **Теоретическое и практическое значение**

Результаты проведенной работы показали реальную возможность использования нового индикатора тектонического напряжения, выделенного при анализе сейсмических данных МОВ ОГТ 3Д, для получения информации о кинематике разломов и параметрах напряженно-деформированного состояния на основании изучения только геометрии поверхностей сейсмических горизонтов и приуроченных к ним поверхностей разрывных нарушений, не требуя дополнительного проведения буровых работ на исследуемом объекте. Более того, полученные данные о параметрах напряженно-деформированного состояния служат для прогноза трещиноватых коллекторов жидких углеводородов, характеризующихся низкой проницаемостью горных пород. Данный подход возможно применять на других геологических объектах, где изучение параметров напряженно-деформированного состояния является затруднительным на сегодняшний день.

#### **Основные защищаемые положения:**

1. На юго-востоке Нюрольской впадины Западно-Сибирской плиты выделяется три этапа деформаций, первые два в мезозое: более древний, сбросовый, характеризующийся субширотной ориентировкой оси девиаторного растяжения и более молодой, сдвиговой, при субширотной ориентировке оси максимального сжатия; а также третий, сдвиговой неотектонический и современный этап деформаций, характеризующийся субмеридиональной ориентировкой оси максимального сжатия.

2. На северном склоне Байкитской антеклизы Сибирской платформы выделяется два этапа сдвиговых деформаций в ходе предвендской складчатости: первый, характеризующийся субмеридиональной осью максимального сжатия и второй, при субширотной ориентировке оси максимального сжатия.

3. Вектор перемещения, определенный при анализе структурных карт поверхностей сейсмических горизонтов МОВ ОГТ 3Д и разрывных нарушений, приуроченных к ним, является индикатором тектонического напряжения для расчета параметров напряженно-деформированного состояния и анализа кинематических характеристик по аналогии с определением данных результатов по зеркалам и бороздам скольжения в природных обнажениях.

### **Фактический материал и личный вклад**

Основным источником данных в настоящей работе служат структурные карты сейсмических горизонтов МОВ ОГТ ЗД и выделенные на них разрывные нарушения, которые были представлены ООО «Газпромнефть НТЦ». Лично автором были разработаны основные положения структурно-геологического подхода к выделению индикатора напряженно-деформированного состояния при анализе сейсмических данных МОВ ОГТ ЗД, проведены опробования подхода на двух геологических объектах, а также выполнена интерпретация результатов исследований.

### **Публикации и апробация работы**

По теме диссертации было опубликовано 11 работ, из них 3 в журналах, включенных в перечень научных изданий ВАК. Различные аспекты работы докладывались на: Всероссийской научно-практической молодежной конференции «Современные исследования в геологии» (СПбГУ), Санкт-Петербург, 2014, 2016; XLVI, XLVIII и XLIX Тектонических совещаний (МГУ), Москва, 2014, 2016, 2017; Четвертой молодежной тектонофизической школе-семинар (ИФЗ РАН), Москва, 2015; Четвертой тектонофизической конференции (ИФЗ РАН), Москва, 2016; рабочей встрече с сотрудниками центра эволюции и геодинамики Земли (CEED), Норвегия, 2016; Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной памяти академика А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Санкт-Петербург, 2017; ежегодном собрании Геологического сообщества Америки (GSA), США, 2017.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа содержит 139 страниц печатного текста, состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. В работе содержится 16 внутритекстовых таблиц, 48 рисунков. Список литературы включает 121 название (из них 82 на русском, 39 – на английском языке).

### **Благодарности**

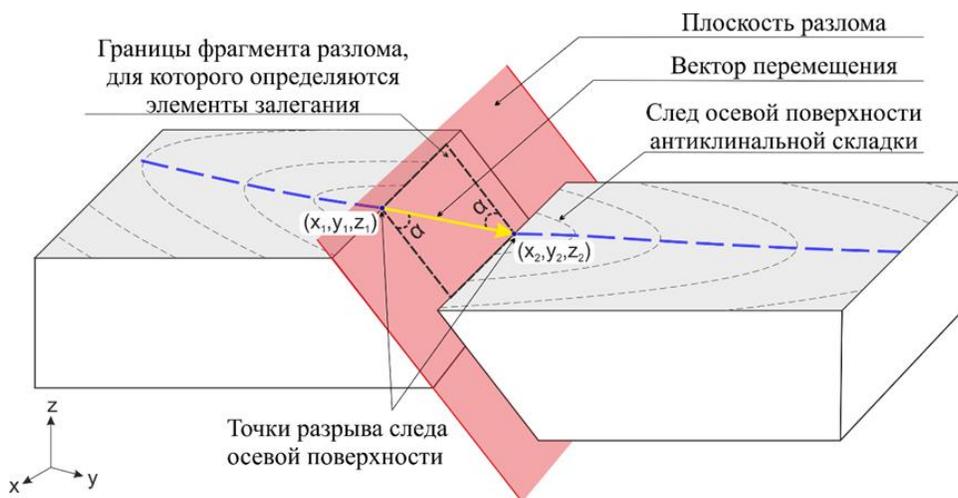
Автор искренне выражает благодарность своему научному руководителю, профессору кафедры региональной геологии Института наук о Земле СПбГУ д.г.-м.н. профессору *Андрею Константиновичу Худолёву* за предоставление ключевой идеи данного подхода, помощь в интерпретации результатов и неоценимую поддержку на протяжении всего хода работы над диссертацией; огромную благодарность автор выражает д.физ.-мат.н. *Юрию Леонидовичу Ребецкому*, д.г.-м.н. *Лидии Андреевне Сим*, к.г.-м.н. *Антону Витальевичу Маринину* (ИФЗ РАН), профессору *Ричарду Альмендингеру* (Richard Allmendinger, Cornell University) и профессору *Нестору Кардозо* (Nestor Cardozo, UIS) за ценные советы по улучшению работы и обсуждение основных концепций реконструкции параметров напряженно-деформированного состояния; к.г.-м.н. *Дмитрию Викторовичу Алексеёву* (ГИН РАН) за поддержку и ценные дискуссии о геодинамической интерпретации полученных результатов; д.г.-м.н. *Юрию Абрамовичу Воложу* (ГИН РАН) за конструктивную критику и обсуждение основных положений разрабатываемого подхода; к.г.-м.н. *Александру Васильевичу Буторину*, *Рустаму Рафаиловичу Хуснитдинову* и *Елене Николаевне Главновой* (ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ НТЦ») за предоставленные сейсмические данные и их совместное обсуждение; *Сергею Петровичу Нилову* (СПбГУ) за поддержку и совместное обсуждение начальных этапов работы; к.г.-м.н. *Виктории Бэртовне Ершовой* (СПбГУ) за поддержку и помощь в поиске необходимых материалов; *Артему Григорьевичу Коннову*, *Дмитрию Константиновичу Перлову* и *Роману Васильевичу Червякову* (ФГБУ «ВСЕГЕИ») за ценные дискуссии по улучшению работы и холодную критику; автор выражает глубокую благодарность *Павлу Ивановичу Машкову* за безграничный интерес к работе и неоценимую поддержку.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертации обоснованы актуальность проблемы, ее научная новизна, сформулированы цели и задачи работы, отражена практическая значимость результатов работы.

### Глава 1. Описание структурно-геологического подхода

Основная идея предлагаемого структурно-геологического подхода выделения нового индикатора тектонического напряжения изображена на рисунке 1 и состоит в том, что выделяемые по сейсмическим данным разлом и вектор перемещения рассматриваются как поверхность разрывного нарушения и борозда скольжения с определенным направлением перемещения, то есть как те структуры, ориентировка которых используется для расчета ориентации осей главных напряжений традиционными методами (Angelier, Mechler, 1977; Парфенов, 1981, 1984; Angelier, 1984; Гзовский, 1975; Ребецкий 1997, 2007 и др.).



**Рис. 1.** Схема определения вектора перемещения по разрывному нарушению. Угол  $\alpha$  – угол между вектором перемещения и направлением падения поверхности разлома, его величина определяет соотношение между сбросо-взбросовой и сдвиговой компонентами перемещения

Согласно данному подходу, на структурной карте отражающего горизонта выбирается характерная структурная форма (антиклинальная или синклиналиная), распознаваемая как в висячем, так и лежащем крыльях разлома. Для выбранной структуры на карте отрисовывается след ее осевой поверхности, который прерывается при пересечении этой структуры разломом. Для точек разрыва следа осевой поверхности определяются координаты, а вектор, соединяющий разъединенные фрагменты следа осевой поверхности, будет являться вектором перемещения. Средствами доступного программного обеспечения определяются элементы залегания фрагмента разлома, в пределах которого находится сам вектор перемещения, что в итоге полностью определяет как кинематические характеристики разрывного нарушения, так и амплитуду перемещения по нему. В этом случае соответствующий фрагмент разлома и расположенный на нем вектор перемещения могут рассматриваться как аналоги зеркал и борозд скольжения на поверхностях разрывных нарушений и служить индикатором тектонического напряжения для дальнейшей реконструкции параметров напряженного состояния уже разработанными методами (Парфенов, 1981, 1984; Ребецкий, 1997, 2007 и др.), имеющие широкое применение в структурной геологии.

Реконструкция параметров напряженно-деформированного состояния при анализе структурных карт сейсмических горизонтов и разрывных нарушений, приуроченных к ним, сводится к следующим

четырем этапам: (1) отбор структурных карт сейсмических горизонтов для структурно-геологических реконструкций; (2) определение кинематических характеристик разрывных нарушений по результатам анализа структурных карт сейсмических горизонтов; (3) создание базы данных с характеристиками разломов и векторов перемещения; (4) реконструкция параметров напряженно-деформированного состояния.

#### Отбор структурных карт сейсмических горизонтов для структурно-геологических реконструкций

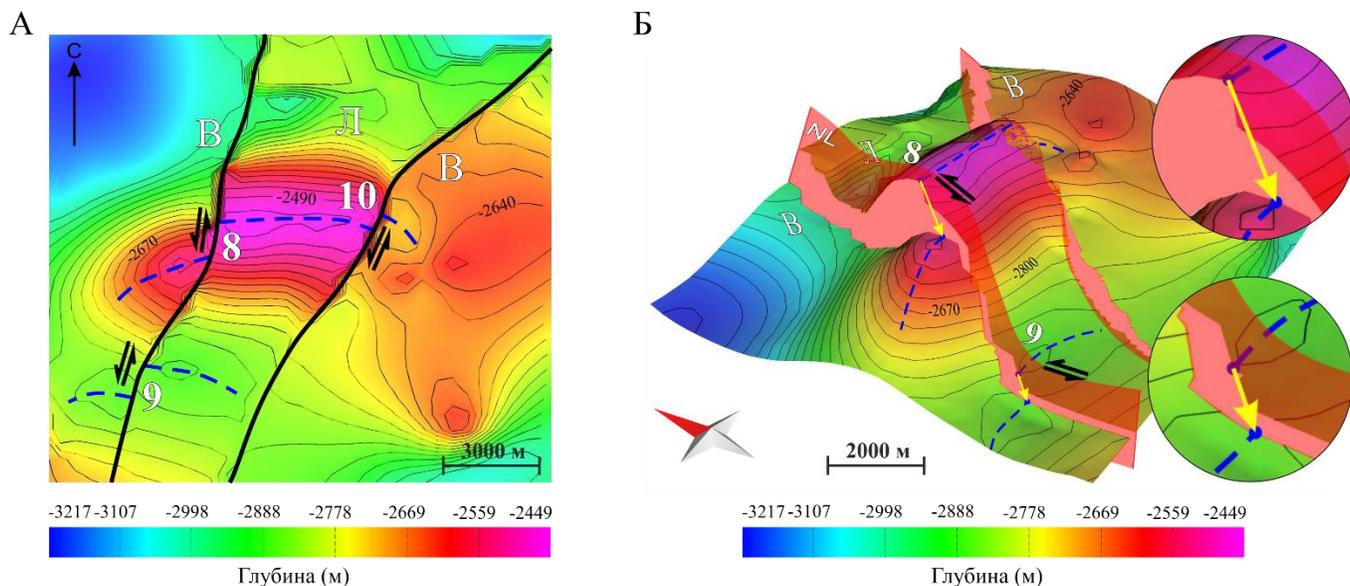
Основным источником данных для расчета параметров напряженно-деформированного состояния служат структурные карты сейсмических горизонтов МОВ ОГТ 3Д в глубинном масштабе и приуроченные к ним поверхности разрывных нарушений. Сейсмические данные предоставлены ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ НТЦ». В настоящей работе используются сейсмические данные МОВ ОГТ 3Д для Арчинского (Западно-Сибирская плита) и Куюмбинского (Сибирская платформа) объектов, характеризующиеся различными геодинамическими обстановками, в которых доминируют сбросо-сдвиговые и взбросо-сдвиговые перемещения соответственно. На примере мезозойского разреза Арчинского объекта идентификация разрывных нарушений и векторов перемещения производилась по сейсмическим горизонтам (снизу вверх по разрезу)  $M_1$ ,  $J_{15}$ ,  $J_{14}$  и  $U_{10}$ , когда для рифейского комплекса Куюмбинского объекта были отобраны горизонты (снизу вверх по разрезу)  $R_4$ ,  $R_3$  и  $R_2$ . Данные горизонты пересекаются разломами с отчетливо определяемыми кинематическими характеристиками при анализе складчатых структур, что необходимо для дальнейшей реконструкции параметров напряженно-деформированного состояния.

#### Определение кинематических характеристик разрывных нарушений по результатам анализа структурных карт сейсмических горизонтов

Предлагаемый подход определения векторов перемещения при анализе структурных карт сейсмических горизонтов во многом субъективен, так как отрисовка следа осевой поверхности в некоторых случаях довольно неоднозначна. Чтобы повысить достоверность выделения следов осевых поверхностей, их определение на картах поверхностей сейсмических горизонтов производится двумя способами: (1) по карте структурных контуров, отвечающих перепаду высот и (2) по карте кривизны поверхности сейсмического горизонта. Первый метод определения следа осевой поверхности подразумевает визуальный анализ морфологии сейсмических горизонтов и выделение схожих структур как в висячем, так и лежащем крыльях разрывного нарушения при построении карт изолиний перепада высот с различным шагом горизонталей. Второй метод определения базируется на математическом расчете коэффициента кривизны поверхности сейсмического горизонта, где значениям максимального коэффициента кривизны поверхности отвечает расположение следа осевой поверхности антиклинальной или синклиальной структуры.

После выделения следов осевых поверхностей складчатых структур, по смещению которых задается вектор перемещения в плоскости разлома, производится анализ кинематических характеристик разрывных нарушений и отвечающих им векторов перемещения. Важно отметить, что при данном анализе возможно определить не только ориентировку разлома и вектора перемещения в пространстве, но и соотношение между сбросо-взбросовой и сдвиговой компонентами перемещения (угол  $\alpha$ ), а также амплитуду перемещения по разлому (полную, вертикальную и горизонтальную). Стоит учитывать, что, если угол  $\alpha$  (см. рис. 1) менее  $45^\circ$ , то преобладает сбросовая (или взбросовая) компонента перемещения, если угол более  $45^\circ$ , то преобладает сдвиговая компонента. Пример выделения вектора перемещения при анализе фрагмента структурной карты сейсмического горизонта  $R_2$  Куюмбинского объекта и приуроченного к нему разрывных нарушений показан на рисунке 2. На

этом рисунке представлена антиклинальная структура фрагмента сейсмического горизонта  $R_2$ , которая разбита разломами как с запада, так и с востока. Разрывные нарушения представлены сбросами с левосдвиговой компонентой перемещения. Вектор перемещения определяется по смещению следа осевой поверхности антиклинали, прослеживаемой по обе стороны каждого из разломов.



**Рис. 2.** Определение вектора перемещения по поверхности сейсмического горизонта  $R_2$  (Куюмбинский объект). А – Вид в плане, шаг горизонталей равен 30 метров. Б – Вид под углом к сейсмической поверхности, вертикальный масштаб превышен в 6 раз. Сплошной линией показано разрывное нарушение, пунктирной – след осевой поверхности, черные стрелки обозначают направление перемещения по простиранию, NL – сброс с левосдвиговой компонентой, Л – лежащее крыло, В – висячее крыло. Цифрой показан номер вектора перемещения, который отвечает базе данных кинематических характеристик разломов для поверхности сейсмического горизонта  $R_2$

Прослеживание в висячем и лежащем крыльях разлома антиклинальных или синклиналичных структурных форм нередко оказывается неоднозначным, даже при выделении следов осевых поверхностей складчатых структур различными методами. Поэтому для дальнейшей реконструкции параметров напряженно-деформированного состояния служат только те векторы перемещения, которые проходят контроль достоверности данных. В настоящей работе используются два основных критерия контроля достоверности выделяемых векторов перемещения. Первый основывается на том, что в пределах одного сегмента разлома не должно происходить частой смены его кинематических характеристик. В частности, исключаются из дальнейшего рассмотрения фрагменты разрывных нарушений, в пределах которых происходит незакономерное чередование правых и левых сдвигов. Второй критерий дополняет предыдущий и заключается в том, что для одного и того же сегмента разрывного нарушения на разных горизонтах должна наблюдаться сходная кинематика. Следовательно, исключаются из рассмотрения те векторы перемещения по которым для нижележащего горизонта фиксируется правый сдвиг, а по вышележащему горизонту левый сдвиг и т.д. В то же время учитывается, что при криволинейной форме разлома сдвиги в разные стороны могут возникать как отклик на надвиговые перемещения (van der Pluijm, Marshak, 2004).

### Создание базы данных с характеристиками разломов и векторов перемещения

После отбраковки недостаточно надежных векторов перемещения данные о кинематических характеристиках разломов суммируются в итоговой базе данных, пример которой представлен в таблице 1, где отображаются следующие характеристики замеров, служащие для кинематического анализа разрывных нарушений и реконструкции параметров напряженно-деформированного состояния: (1) номер замера на карте; (2) элементы залегания фрагмента разлома (азимуты падения и простирания разлома и угол его падения); (3) элементы залегания вектора перемещения (азимут, угол погружения и угол наклона вектора перемещения в плоскости разлома (rake)); (4) угол  $\alpha$  – угол, показывающий, насколько вектор перемещения отклоняется от направления падения разлома, т.е. указывает на величину сдвиговой компоненты; (5) тип перемещения (сброс с левосдвиговой компонентой перемещения, взброс и т.д.); (6) характеристика величины вектора перемещения (амплитуда полного перемещения).

Необходимо учитывать, что данные кинематические характеристики используются при расчете параметров тектонического напряжения по зеркалам и/или бороздам скольжения в методах квазиглавных напряжений (Парфенов, 1981, 1984) и катакластического анализа (Ребецкий, 1997, 2007). Таким образом, полученный массив данных по кинематике разрывных нарушений и приуроченных к ним векторов перемещения по сейсмическим данным МОВ ОГТ 3Д возможно использовать при реконструкции параметров напряженно-деформированного состояния традиционными методами. В тех случаях, когда вектор перемещения отсутствует, разлом может рассматриваться как аналог трещины отрыва, но подобные ситуации наиболее неоднозначны и сложны для диагностики, и по этой причине для определения параметров напряженного состояния использовались только данные по векторам перемещения.

### Реконструкция параметров напряженно-деформированного состояния

Для расчета параметров напряженно-деформированного состояния по данным о пространственной ориентировке разломов и векторов перемещения использовались алгоритмы расчета методов квазиглавных напряжений (Парфенов, 1981, 1984) и катакластического анализа (Ребецкий, 1997, 2007). Выбор данных методов определяется тем, что в них заложены алгоритмы определения параметров напряженного состояния по структурно-кинематическим данным сколовых трещин, традиционно определяемые по зеркалам и/или бороздам скольжения в отличие от методов (Николаев, 1977; Engelder, 1980; Сим, 1991; Gartrell, Lisk, 2005), где при расчете параметров напряженного состояния используются иные геологические индикаторы тектонического напряжения. В то же время, необходимо отметить, что методы квазиглавных напряжений и катакластического анализа на сегодняшний день реализованы в программном обеспечении, позволяя наиболее быстро и удобно производить расчет параметров напряженного состояния, работая с большим массивом данных. Необходимо учитывать, что реконструкция параметров напряженного состояния производится при анализе структурных карт сейсмических горизонтов МОВ ОГТ 3Д, располагающихся на определенной глубине. Следовательно, из-за действия массовых сил на глубине практически везде напряжения сжимающие и таким образом для осей главных напряжений используются следующие индексы и наименования: главные напряжения минимального сжатия или девиаторного растяжения ( $\sigma_1$ ), промежуточные ( $\sigma_2$ ) и главные напряжения максимального сжатия ( $\sigma_3$ ). Необходимо отметить, что в методе квазиглавных напряжений производится расчет только ориентировки осей главных напряжений по структурно-кинематическим данным, тогда как в методе катакластического анализа рассчитывается также геодинамический тип напряженного состояния (I) и коэффициент Лоде-Надаи ( $\mu_s$ ), определяющий форму стресс-эллипсоида.

Таблица 1

Пример базы данных с характеристиками разломов и векторов перемещения

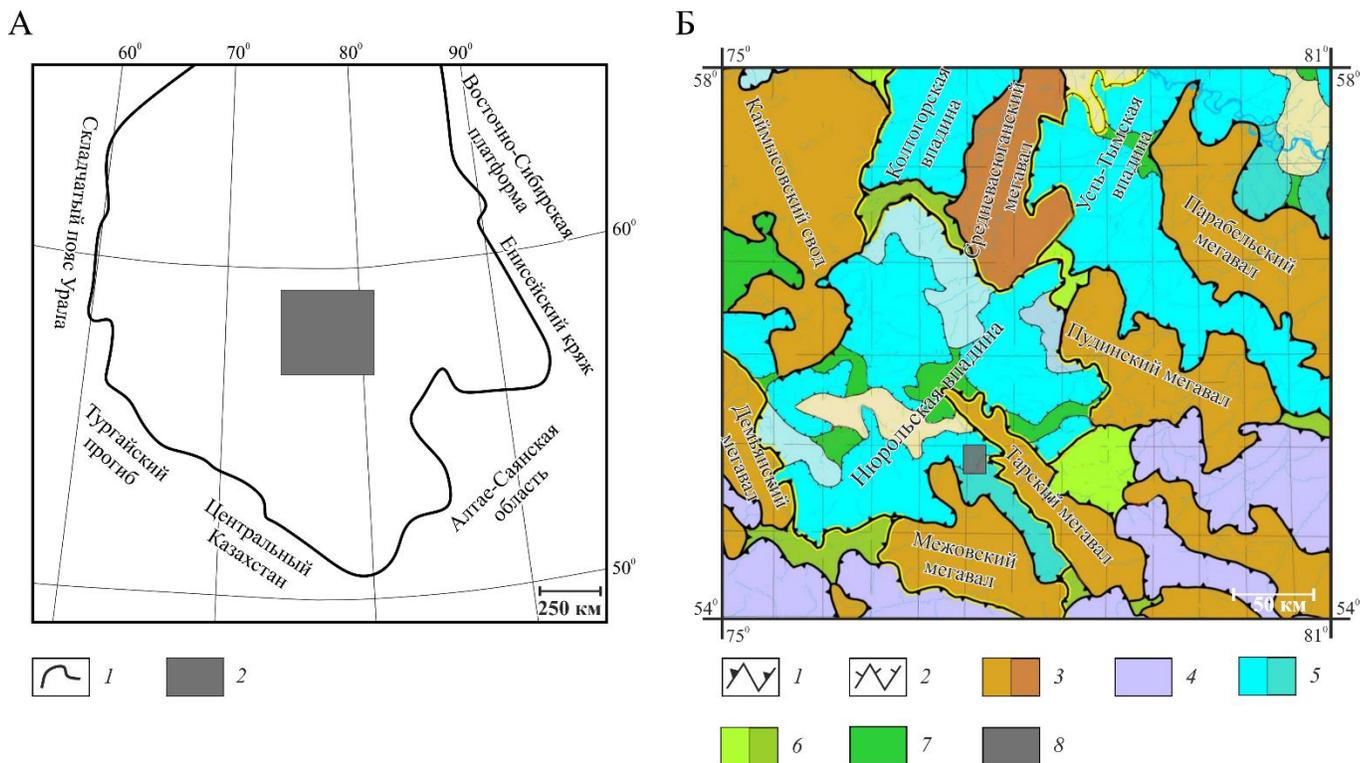
Сейсмический горизонт	Номер замера на карте	Элементы залегания разлома			Элементы залегания вектора перемещения			Угол $\alpha$	Тип перемещения	Амплитуда полного перемещения в метрах
		Азимут простирания	Азимут падения	Угол падения	Азимут погружения	Угол погружения	Угол наклона (rake)			
M <sub>1</sub>	57	168	258	85	172	36	36	54	NL	32
J <sub>15</sub>	1	128	218	79	307	3	177	87	NR	260
J <sub>14</sub>	24	329	59	69	147	4	176	86	NR	74
U <sub>10</sub>	15	343	73	68	163	1	179	79	NR	62
R <sub>4</sub>	13	70	160	53	243	9	168	78	TL	1588
R <sub>3</sub>	11	350	80	88	169	17	163	73	NR	642
R <sub>2</sub>	8	192	282	72	194	5	5	85	NL	1251
	9	186	276	72	186	3	3	87	NL	864
	10	36	126	88	36	8	8	82	NL	1729

*Примечание.* Угол  $\alpha$  – острый угол между вектором перемещения и направлением падения поверхности разлома (см. рис. 1). TL – взброс с левосдвиговой компонентой, NL – сброс с левосдвиговой компонентой, NR – сброс с правосдвиговой компонентой.

## Глава 2. Применение структурно-геологического подхода на Арчинском объекте

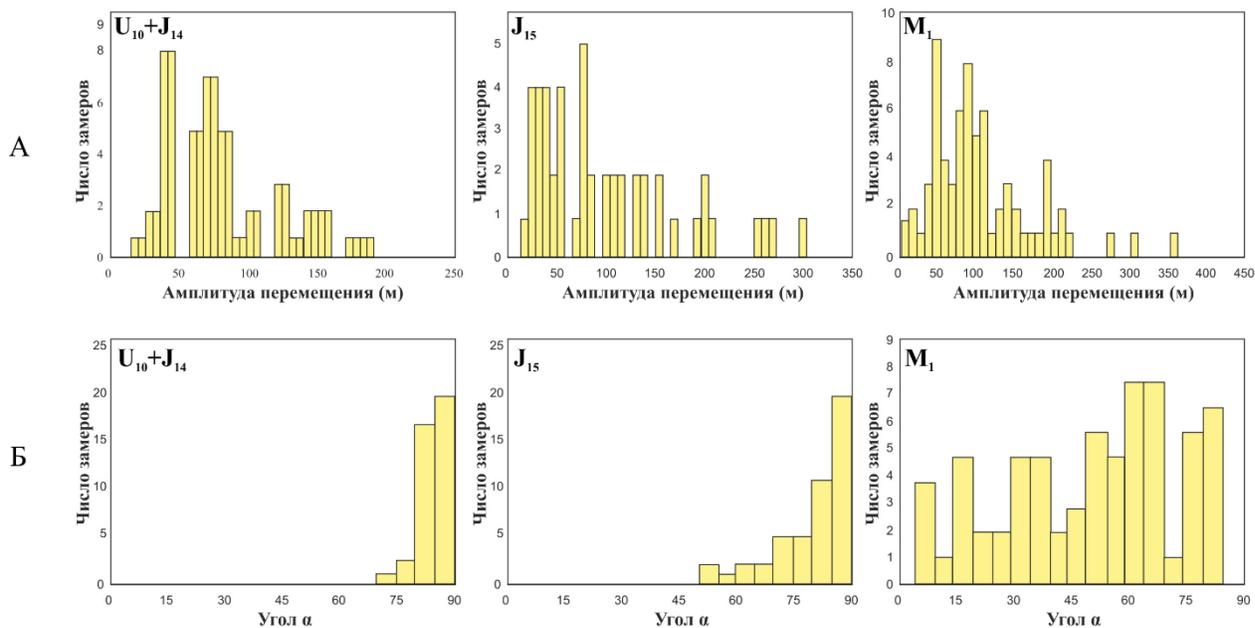
Объект исследования располагается в пределах Арчинского лицензионного участка нефтяного месторождения на юго-востоке Нюрольской впадины, которая находится в юго-восточной части Западно-Сибирской плиты и географически приурочена к междуречью Оби и Васюгана. В тектоническом плане Нюрольская впадина ограничена Каймысовским сводом, а также Демьянским, Межовским, Тарским, Средневасюганским и Пудинским мегавалами (рис. 3). Арчинский объект по поверхности доюрского фундамента представляет собой локальное поднятие и имеет сравнительно небольшие размеры по площади  $14 \times 18$  км<sup>2</sup>, пространственно приурочен к области развития карбонатного палеозойского комплекса фундамента, который несогласно перекрыт мезозойско-кайнозойским терригенным осадочным чехлом.

Реконструкция параметров напряженно-деформированного состояния при анализе структурных карт сейсмических горизонтов МОВ ОГТ 3Д и приуроченных к ним поверхностей разрывных нарушений на Арчинском объекте проводилась при анализе четырех сейсмических горизонтов: M<sub>1</sub> (контакт палеозойского фундамента, включая переотложенную кору выветривания, и мезозойского осадочного комплекса); J<sub>15</sub> (вблизи кровли салатской свиты, нижняя юра); J<sub>14</sub> (в нижней части тюменской свиты, средняя юра) и U<sub>10</sub> (граница между нижней и верхней частью тюменской свиты, средняя юра). Данные сейсмические горизонты содержат разломы, по которым отчетливо определяются смещения диагностируемых складчатых структур (Москаленко и др., 2015). По результатам интерпретации сейсмических данных МОВ ОГТ 3Д в пределах Арчинского объекта выделяется 2 системы разрывных нарушений, преимущественно ССЗ-ЮЮВ и З-В простираний. Разломы идентифицируются как крутопадающие плоскости с углами падения от 70° до 90° и преобладанием сбросо-сдвиговых перемещений.



**Рис. 3.** Расположение района работ. А – Западно-Сибирская плита и ее обрамление: 1 – граница Западно-Сибирской плиты (Surkov et al., 1995, с изменениями автора), 2 – граница рисунка 3Б, Б – Юго-восточный фрагмент тектонической карты центральной части Западно-Сибирской плиты (Шпильман, Змановский, 1998, с изменениями автора): 1 – границы тектонических элементов I порядка, 2 – границы внутреннего районирования тектонических элементов I порядка, 3 – своды, 4 – моноклинали, 5 – впадины, 6 – террасы, 7 – седловины, 8 – район работ (Арчинский объект)

При анализе поверхности сейсмического горизонта  $M_1$  и приуроченных к нему разрывных нарушений выделено 70 замеров,  $J_{15}$  – 48 замеров,  $J_{14}$  – 26 замеров и  $U_{10}$  – 15 замеров. Процент отбраковки векторов перемещения для всех поверхностей сейсмических горизонтов составил не более 14%. Сравнение амплитуд полных перемещений по разрывным нарушениям (рис. 4а) отображает тенденцию уменьшения амплитуд перемещения вверх по разрезу. Для сейсмического горизонта  $M_1$  амплитуды перемещения варьируют от 16 м до 353 м (в среднем 114 м),  $J_{15}$  – от 17 м до 293 м (в среднем 102 м),  $J_{14}$  – от 38 м до 190 м (в среднем 92 м) и  $U_{10}$  – от 26 м до 176 м (в среднем 73 м). Анализируя распределение угла  $\alpha$  в плоскостях разломов, можно выделить 2 генерации разрывных нарушений, где первая характеризуется преимущественно сбросовой компонентой перемещения и фиксируется только на поверхности сейсмического горизонта  $M_1$ , а вторая сдвиговой, присутствующей на поверхностях всех сейсмических горизонтов (рис. 4б). Таким образом, можно предполагать, что на временном интервале после накопления слоев, ограниченных сейсмическим горизонтом  $M_1$ , но до накопления слоев, ограниченных сейсмическим горизонтом  $J_{15}$  произошло значительное изменение кинематических характеристик разломов, что позволяет выделить 2 этапа формирования разрывных нарушений: (1) сбросовой – более ранний и отчетливо проявленный в кинематических характеристиках разломов на сейсмическом горизонте  $M_1$  и (2) сдвиговой – более поздний, доминирующий в разрывных нарушениях на сейсмических горизонтах  $J_{15}$ ,  $J_{14}$  и  $U_{10}$ . Более того, различие кинематических характеристик разрывных нарушений для сейсмического горизонта  $M_1$  и вышележащих горизонтов подтверждается анализом сокращения их поверхности (Москаленко, Нилов, 2014).

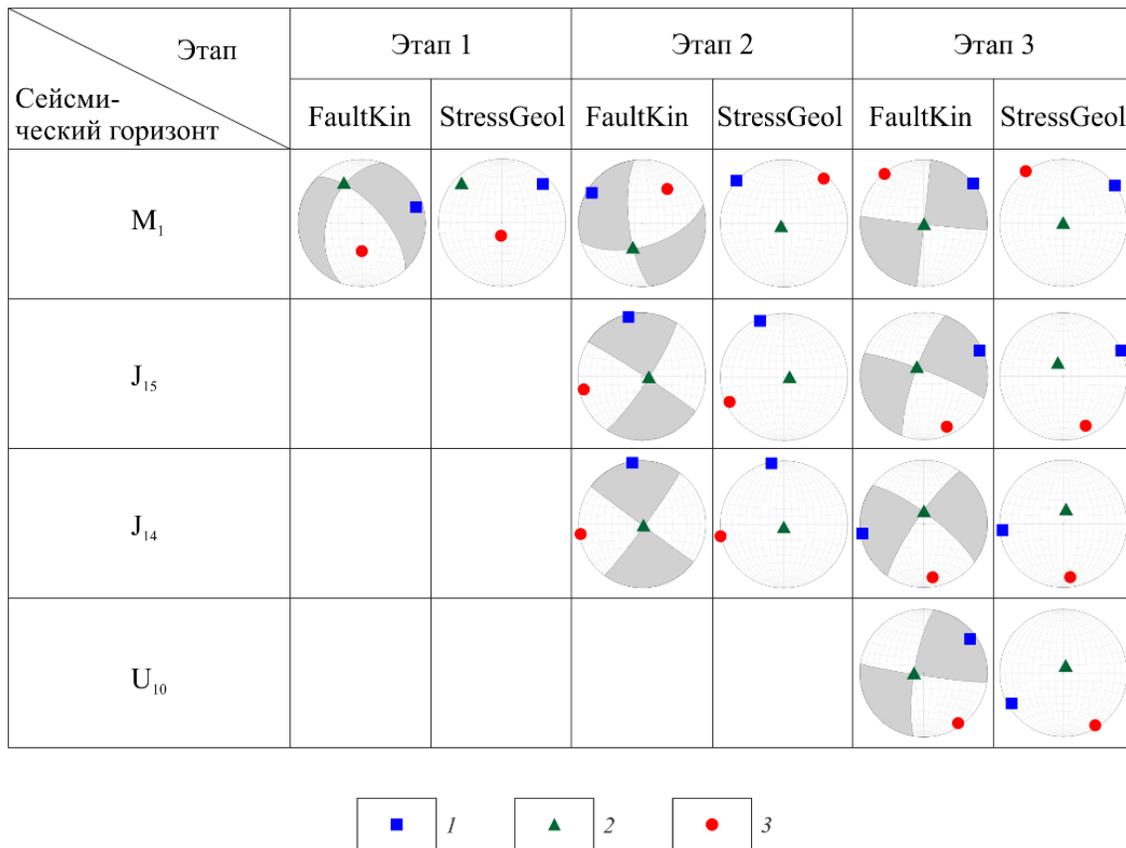


**Рис. 4.** Характеристики векторов перемещения по горизонтам  $M_1$ ,  $J_{15}$ ,  $J_{14}$  и  $U_{10}$ . А – гистограммы распределения амплитуд полных перемещений, Б – гистограммы распределения угла  $\alpha$

Реконструкция параметров напряженно-деформированного состояния для Арчинского объекта по каждому сейсмическому горизонту проводилась методами квазиглавных напряжений (в программном обеспечении «FaultKin») и катакластического анализа (в программном обеспечении «StressGeol»). Для сейсмического горизонта  $M_1$ , приуроченного к наиболее древнему комплексу, выделено 3 генерации напряженно-деформированного состояния, тогда как для вышележащих сейсмических горизонтов  $J_{15}$  и  $J_{14}$  выделено по 2 генерации, а для горизонта  $U_{10}$  (характеризующегося наименьшим количеством дешифрируемых складчатых структур) только 1 генерация напряженно-деформированного состояния. При анализе полученных генераций на сейсмических горизонтах, отвечающих различным возрастам, выделяется 3 этапа деформаций (рис. 5).

Первый этап характеризуется режимом горизонтального растяжения и фиксируется смещениями по разрывным нарушениям только для поверхности сейсмического горизонта  $M_1$  (рис. 5). Это подтверждается ориентировкой осей главных напряжений, где ось максимального сжатия ( $\sigma_3$ ) субвертикальна, а оси девиаторного растяжения ( $\sigma_1$ ) и промежуточная ось ( $\sigma_2$ ) субгоризонтальны, при этом ось девиаторного растяжения имеет северо-восточное направление. Сбросовая тектоника на данный этап времени подтверждается и расчетом в программе «StressGeol» значения геодинамического типа напряженного состояния (I), которое отвечает режиму горизонтального растяжения. Величина коэффициента Лоде-Надаи равна -0.42 и характеризует форму стресс-эллипсоида как вытянутого эллипсоида вращения (табл. 2). Второй и третий этапы отвечают смещениям по разрывным нарушениям для сейсмических горизонтов  $J_{15}$ ,  $J_{14}$  и  $U_{10}$  (рис. 6), где промежуточные оси ( $\sigma_2$ ) субвертикальны, а оси девиаторных растяжений ( $\sigma_1$ ) и максимального сжатия ( $\sigma_3$ ) субгоризонтальны, что характеризует обстановку сдвига. Однако, для второго этапа оси максимального сжатия имеют ориентировки от северо-восточной до восток-северо-восточной, тогда как для третьего этапа происходит инверсия осей максимального сжатия и девиаторного растяжения, и оси максимального сжатия характеризуются ориентировками от северо-северо-западной до северной. Важно отметить, что на обстановку сдвига указывают значения геодинамического типа напряженного состояния (I), которые отвечают режиму горизонтального сдвига (табл. 2).

Выделенные этапы деформаций согласуются с палеогеодинамическими моделями исследуемого региона, где в раннем-среднем триасе на территории господствовали процессы рифтогенеза и интенсивного прогибания, апогеем которых послужило образование крупных разрывных нарушений (Сурков, Шацкий, 1983, Иванов и др., 2005; Reichow et al., 2009; Филиппович, 2012), а в ранней юре развитием крупных сдвигов (Пучков, 2000). Более того, один из этапов деформаций, характеризующийся режимом горизонтального сдвига, имеет субмеридиональную ориентировку оси максимального сжатия, что отвечает неотектоническому и современному этапу напряженного состояния, полученному в результате геофизического изучения скважин с применением электрических микросканеров FMI Schlumberger (Буторина и др., 2014; Главнова и др., 2015), а также реконструкции неотектонического и современного напряженного состояния структурно-геоморфологическим методом Л.А. Сим (Зиганшина, Сидельник, 2016).



**Рис. 5.** Ориентировка осей главных напряжений для каждого этапа эволюции разрывных нарушений по горизонтам  $M_1$ ,  $J_{15}$ ,  $J_{14}$  и  $U_{10}$ : 1 – ось девиаторного растяжения ( $\sigma_1$ ), 2 – промежуточная ось ( $\sigma_2$ ), 3 – ось максимального сжатия ( $\sigma_3$ ). Белое поле на стереограммах – квадрант сжатия, серое – квадрант растяжения. Сетки Шмидта, проекция нижней полусферы

Таблица 2

Результаты расчета параметров напряженно-деформированного для сейсмических горизонтов  $M_1$ ,  $J_{15}$ ,  $J_{14}$  и  $U_{10}$ , рассчитанных в программе «StressGeol»

Сейсмический горизонт	Ось девиаторного растяжения ( $\sigma_1$ )		Промежуточная ось ( $\sigma_2$ )		Ось максимального сжатия ( $\sigma_3$ )		Коэффициент Лоде-Надаи ( $\mu_s$ )	Геодинамический тип напряженного состояния (I)
	Азимут погружения	Угол погружения	Азимут погружения	Угол погружения	Азимут погружения	Угол погружения		
Этап 1								
$M_1$	47	11	315	13	177	73	-0,42	1
Этап 2								
$M_1$	312	0	222	85	42	6	-0,13	3
$J_{15}$	337	5	108	82	246	6	-0,26	3
$J_{14}$	349	5	168	85	259	0	-0,1	3
Этап 3								
$M_1$	54	0	270	90	324	0	-0,37	3
$J_{15}$	66	0	336	74	156	16	-0,05	3
$J_{14}$	264	6	13	72	172	17	0,04	3
$U_{10}$	240	6	17	82	149	6	0,01	3

В результате применения структурно-геологического подхода определения индикатора тектонического напряжения, выделенного при анализе структурных карт сейсмических горизонтов  $M_1$ ,  $J_{15}$ ,  $J_{14}$  и  $U_{10}$  на Арчинском объекте проведен анализ кинематических характеристик разрывных нарушений и произведена реконструкция параметров напряженно-деформированного состояния. Создана база данных, содержащая информацию о кинематике разрывных нарушений (азимуты падения и простирания разлома и угол его падения, угол  $\alpha$  и тип перемещения по разрывному нарушению), ориентировке векторов перемещения (азимут, угол погружения и угол наклона вектора перемещения в плоскости разлома (rake)) и величине вектора перемещения (амплитуда полного перемещения). Основные выводы сводятся к следующим пунктам:

- установлено, что наиболее интенсивные вертикальные перемещения фиксируются для поверхности сейсмического горизонта  $M_1$ , где для большинства разломов перемещение по падению (сбросовая кинематика) является значительным. Для разрывных нарушений, фиксируемых на поверхности отражающих горизонтов  $J_{15}$ ,  $J_{14}$  и  $U_{10}$ , доминирующей компонентой перемещения является сдвиговая. Изменение кинематических характеристик разломов связывается с событием, произошедшим в раннеюрское время;
- установлено наличие трех этапов деформаций на исследуемом регионе: (1) рифтогенез при субширотной ориентировке оси растяжения, с которым связана активизация основной части разрывных нарушений; (2) первая реактивация разрывных нарушений с преимущественно сдвиговой компонентой перемещения при субширотной ориентировке оси максимального сжатия; (3) вторая реактивация разрывных нарушений с преимущественно сдвиговой компонентой перемещения при субмеридиональной ориентировке оси максимального сжатия;

- разработана модель тектонической эволюции региона с выделением рифтогенеза в раннем–среднем триасе и позднем триасе–ранней юре, сдвиговых деформаций в ранней–средней юре, неотектонических и современных сдвиговых деформации. Показано, что предлагаемая модель исследуемого региона коррелируется с общепринятыми палеогеодинамическими реконструкциями, а также работами предшественников.

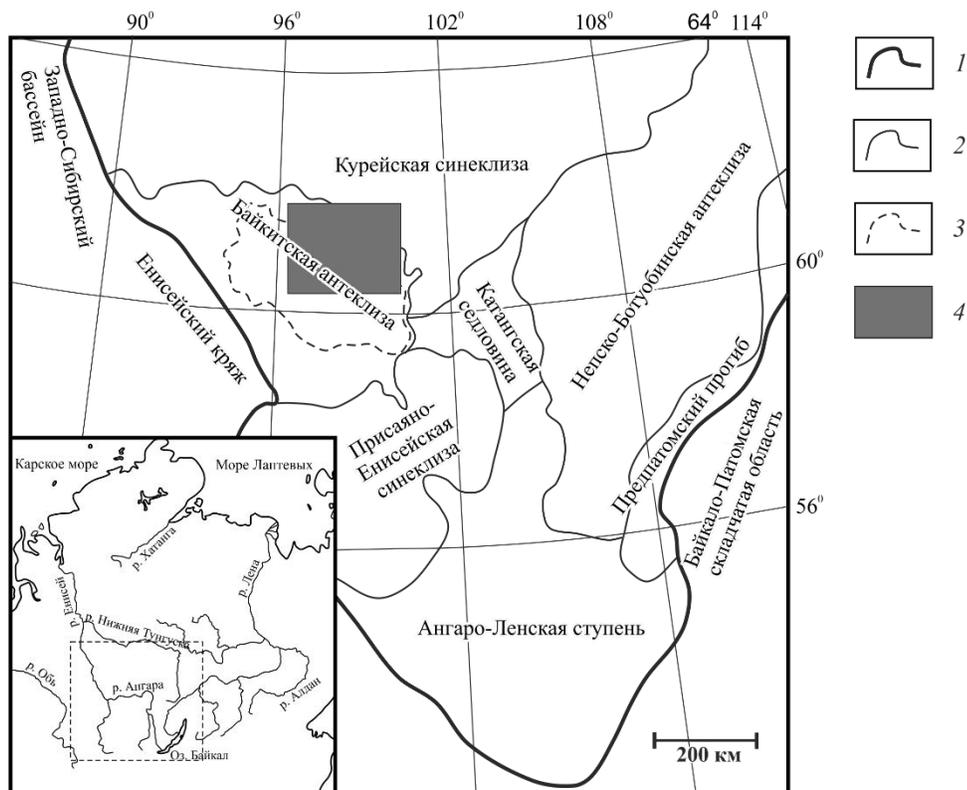
На основе полученных результатов сформулировано первое защищаемое положение:

***На юго-востоке Нюрольской впадины Западно-Сибирской плиты выделяется три этапа деформаций, первые два в мезозое: более древний, сбросовый, характеризующийся субширотной ориентировкой оси девиаторного растяжения и более молодой, сдвиговой, при субширотной ориентировке оси максимального сжатия; а также третий, сдвиговой неотектонический и современный этап деформаций, характеризующийся субмеридиональной ориентировкой оси максимального сжатия.***

### **Глава 3. Применение структурно-геологического подхода на Куюмбинском объекте**

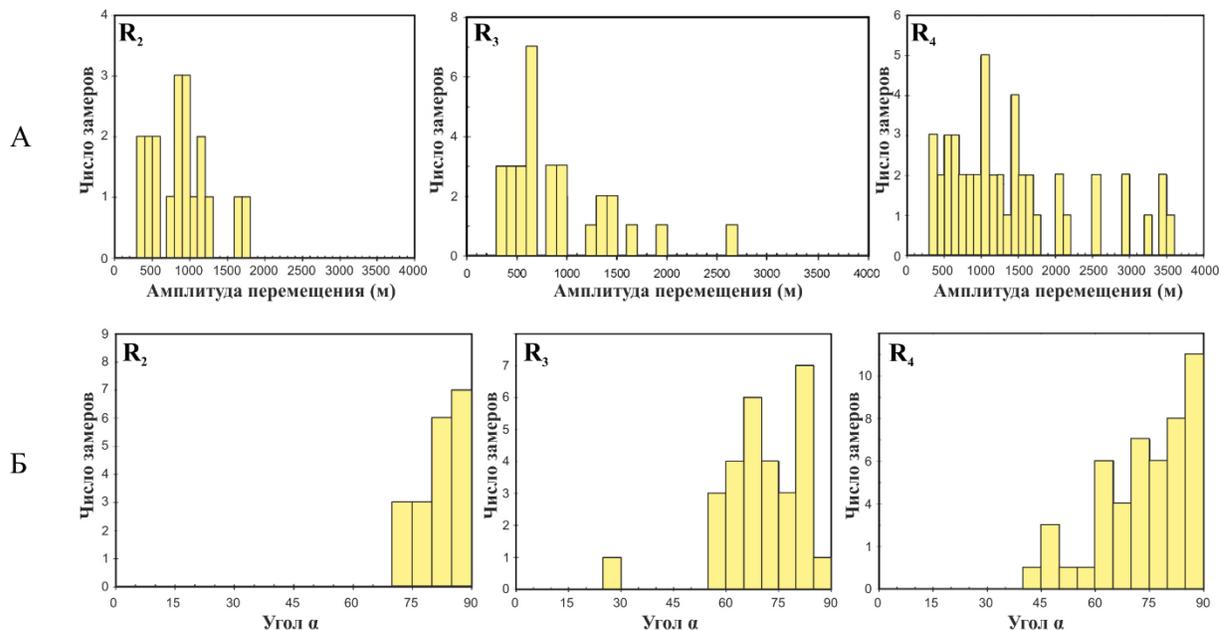
Район работ принадлежит Куюмбинско-Юрубчено-Тохомской зоне нефтегазонакопления, которая находится на юго-западе Сибирской платформы в пределах Камовского свода Байкитской антеклизы и географически приурочена к среднему течению р. Подкаменная Тунгуска. Куюмбинский объект имеет размеры по площади  $169 \times 215$  км<sup>2</sup> и располагается на северо-востоке Байкитской антеклизы, ориентированной в северо-восточном направлении вдоль восточной границы Енисейского кряжа (рис. 6). Платформенный разрез Куюмбинской территории характеризуется наличием двух структурных этажей – рифейского и венд-кембрийского (Конторович и др., 1996; Харахинов и др., 2011; Хабаров и др., 2002, 2011 и др). Рифейский комплекс деформирован, сложен карбонатными и терригенно-карбонатными отложениями, которые залегают на метаморфическом архей-нижнепротерозойском фундаменте (Харахинов и др., 2011; Харахинов, Шленкин, 2011; Фролов и др., 2013; Frolov et al., 2015). Выше по разрезу с угловым несогласием залегают плитный венд-кембрийский комплекс, где венд и кембрий представлен сульфато-глинисто-карбонатными и галогенно-карбонатными комплексами пород соответственно (Мельников и др., 2005; Харахинов и др., 2011). Породы венд-кембрийского комплекса залегают субгоризонтально и с отчетливым угловым несогласием в основании перекрывают различные толщи рифея и, локально, кристаллического фундамента. В настоящей работе основным объектом исследования является рифейский комплекс северного склона Байкитской антеклизы, где разрывные нарушения выше эрозионной поверхности рифея не прослеживаются (Москаленко и др., 2017).

Применение структурно-геологического подхода реконструкции параметров напряженно-деформированного состояния на Куюмбинском объекте проводилось при анализе структурных карт трех сейсмических горизонтов: R<sub>4</sub> (в основании мадринской толщи, нижний рифей), R<sub>3</sub> (вблизи кровли копчерской толщи, средний рифей) и R<sub>2</sub>, (вблизи подошвы токурской толщи, средний рифей). По результатам анализа структурных карт сейсмических горизонтов и приуроченных к ним разломов в пределах района исследования наиболее широко развиты разрывные нарушения ВСВ-ЗЮЗ и ССЗ-ЮЮВ направлений. Разрывные нарушения имеют как сбросовую, так и взбросовую компоненты перемещения. Сдвиговая компонента присутствует в большинстве разломов, но закономерностей в распределении лево- и правосдвиговых перемещений не прослеживается. В целом, разрывные нарушения идентифицируются как крутопадающие поверхности с углами падения от 70° до 90°, но встречаются и более пологие разломы с углами падения от 50° до 60°.



**Рис. 6.** Схема тектонического районирования юго-запада Сибирской платформы (Хераскова и др., 2009; Frolov et al., 2015, с изменениями автора): 1 – граница Сибирской платформы, 2 – границы основных структур, 3 – граница Камовского свода, 4 – район работ (Куюмбинский объект)

Результаты расчета кинематических характеристик разрывных нарушений показывают, что число складчатых структур, по смещению которых можно произвести замер векторов перемещения, убывает вверх по разрезу. Процент отбраковки векторов перемещения для всех поверхностей сейсмических горизонтов составил не более 12%. В итоге, по разрывным нарушениям, фиксируемым на поверхности сейсмического горизонта  $R_4$  выделено 48 замеров,  $R_3$  – 29 замеров и  $R_2$  – 19 замеров. Сходная тенденция фиксируется и сравнением амплитуд полных перемещений по разрывным нарушениям (рис. 7а), которые для сейсмического горизонта  $R_2$  изменяются в пределах примерно от 350 м до 1730 м, тогда как для горизонтов  $R_3$  наибольшая амплитуда перемещения составляет примерно 2640 м, а для  $R_4$  3590 м. При всей условности расчета средних величин, средние величины полных перемещений для разрывных нарушений, фиксируемых на разных сейсмических горизонтах, составляют около 885 м для  $R_2$ , 903 м для  $R_3$  и 1412 м для  $R_4$ , также указывая на уменьшение амплитуд перемещения вверх по разрезу. В то же время, на основе данных по распределению угла  $\alpha$  в плоскости разлома на сейсмических горизонтах  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  (рис. 7б), возможно установить два этапа формирования разрывных нарушений. Для всех разломов, кроме одного разлома на горизонте  $R_3$  и одного разлома на горизонте  $R_4$ , преобладает сдвиговая компонента, но количественное соотношение между сдвиговой и ориентированной по падению/восстанию плоскости разлома компонентами, фиксируемое на разных сейсмических горизонтах, существенно различное. Для разломов, фиксируемых на сейсмических горизонтах  $R_3$  и  $R_4$ , взбросовая компонента довольно значительна, тогда как для разломов, фиксируемых на горизонте  $R_2$ , сдвиговая компонента доминирует и для большинства разломов ориентировка вектора перемещения в плоскости разлома отличается от горизонтальной линии менее чем на  $10^\circ$ .



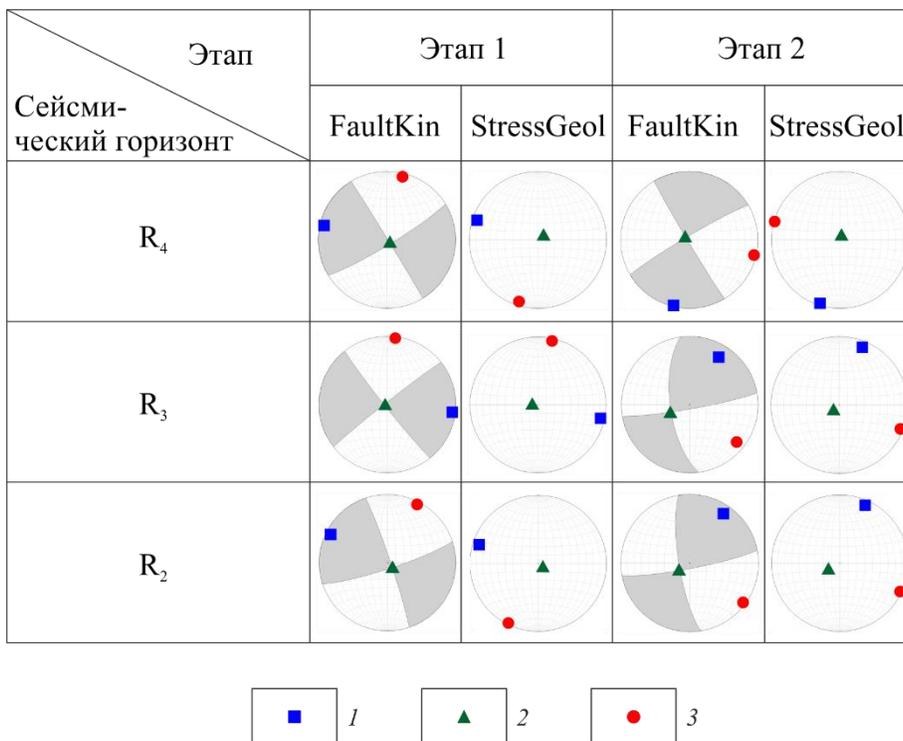
**Рис. 7.** Характеристики векторов перемещения по горизонтам  $R_4$ ,  $R_3$  и  $R_2$ . А – гистограммы распределения амплитуд полных перемещений, Б – гистограммы распределения угла  $\alpha$

Таким образом, на временном интервале после накопления слоев, ограниченных сейсмическим горизонтом  $R_3$ , но до накопления слоев, ограниченных сейсмическим горизонтом  $R_2$ , произошло значительное изменение кинематических характеристик разломов, что позволяет выделить 2 стадии формирования разрывных нарушений: (1) преимущественно взбросо-сдвиговая – более ранняя и отчетливо проявленная в кинематических характеристиках разломов на сейсмических горизонтах  $R_3$  и  $R_4$ , и (2) сдвиговая – более поздняя, доминирующая в разрывных нарушениях на сейсмическом горизонте  $R_2$ . Необходимо отметить, что формирование каркаса разломов произошло, скорее всего, во время рифтогенеза, имевшего место около 1500 млн лет и сопровождавшегося внедрением силлов основного состава и накоплением в сформировавшихся прогибах песчаников (Хабаров и др. 2002). Возникшие в это время разломы, преимущественно сбросы, в дальнейшем, на стадии формирования и эволюции пост-рифтового осадочного бассейна, были реактивированы как взбросы и сдвиги.

Средние полные амплитуды перемещения по разломам для горизонтов  $R_3$  и  $R_2$  близки друг к другу (885 и 903 м соответственно), что свидетельствует о том, что наиболее интенсивные деформации происходили после формирования пород, ограниченных горизонтам  $R_2$ , тогда как установленное более раннее тектоническое событие нашло отражение только в небольших взбросовых и/или сбросовых подвижках по разрывным нарушениям. С учетом заметного преобладания взбросов (75%) над сбросами (25%), установленное тектоническое событие было, скорее всего, связано с деформациями сжатия.

Реконструкция параметров напряженно-деформированного состояния позволяет выделять 2 этапа сдвиговых деформаций на Куюмбинском объекте. Первый этап представлен схожей ориентировкой осей главных напряжений для всех сейсмических горизонтов с осью максимального сжатия, характеризующейся субгоризонтальным залеганием и субмеридиональной ориентировкой на горизонтах  $R_3$  и  $R_4$ , и север-северо-восточной ориентировкой на горизонте  $R_2$ . Ось девиаторного растяжения также субгоризонтальна и ориентирована перпендикулярно оси максимального сжатия. Второй этап формирования разрывных нарушений для всех сейсмических горизонтов также характеризуется субгоризонтальным залеганием осей наибольшего сжатия и девиаторного

растяжения, но с инверсией их ориентировок для сейсмических горизонтов  $R_2$  и  $R_4$ , а также инверсией и небольшим разворотом для горизонта  $R_3$  (рис. 8). Необходимо отметить, что полученные результаты расчета ориентировок осей главных напряжений различными методами (квазиглавных напряжений в программе «FaultKin» и катакластического анализа в программе «StressGeol») согласуются между собой.



**Рис. 8.** Ориентировка осей главных напряжений для каждого этапа эволюции разрывных нарушений Куюмбинского объекта по горизонтам  $R_4$ ,  $R_3$  и  $R_2$ : 1 – ось девиаторного растяжения ( $\sigma_1$ ), 2 – промежуточная ось ( $\sigma_2$ ), 3 – ось максимального сжатия ( $\sigma_3$ ). Белое поле на стереограммах – квадрант сжатия, серое – квадрант растяжения. Сетки Шмидта, проекция нижней полусферы

Следовательно, на поверхностях всех сейсмических горизонтов оси главных напряжений имеют схожую ориентировку для каждого этапа, где промежуточные оси ( $\sigma_2$ ) субвертикальны, а оси девиаторных растяжений ( $\sigma_1$ ) и максимального сжатия ( $\sigma_3$ ) субгоризонтальны, что характеризует обстановку сдвига. Также, на близкую к сдвиговой обстановке указывают и значения геодинамического типа (I), рассчитанные методом катакластического анализа в программе «StressGeol» (табл. 3). Таким образом, в предвендское время выделяется два этапа сдвиговых деформаций, где первый этап характеризуется субмеридиональной осью максимального сжатия, а второй – запад-северо-западной осью максимального сжатия. Возраст полученных этапов деформаций не установлен, однако можно предполагать, что первый этап предвендских деформаций в рассматриваемом регионе происходил после тектонических событий на Енисейском кряже, связанных с формированием складчато-надвиговой структуры, которые определяются внедрением коллизионных гранитов аяхтинского комплекса, имеющие возраст около 760–750 млн лет (Верниковский и др., 1994; Верниковская 2005). Второй этап предвендских деформаций может соответствовать завершающим стадиям развития активной окраины, которым отвечает, в частности, метаморфизм офиолитов и островодужных вулканитов Исаковского офиолитового комплекса возраста около 685–600 млн лет (Верниковский и др., 1994; Хераскова и др., 2009).

Таблица 3

Результаты расчета параметров напряженно-деформированного состояния для сейсмических горизонтов R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> и R<sub>4</sub>, рассчитанных в программе «StressGeol»

Сейсмический горизонт	Ось девиаторного растяжения ( $\sigma_1$ )		Промежуточная ось ( $\sigma_2$ )		Ось максимального сжатия ( $\sigma_3$ )		Коэффициент Лоде-Надаи ( $\mu_s$ )	Геодинамический тип напряженного состояния (I)
	Азимут погружения	Угол погружения	Азимут погружения	Угол погружения	Азимут погружения	Угол погружения		
Этап 1								
R <sub>4</sub>	288	6	64	82	198	6	0,09	3
R <sub>3</sub>	102	6	282	84	12	0	0,16	3
R <sub>2</sub>	288	11	108	79	198	0	0	3
Этап 2								
R <sub>4</sub>	197	6	18	85	287	0	-0,07	3
R <sub>3</sub>	22	10	233	78	113	6	0,05	3
R <sub>2</sub>	24	5	204	85	114	0	-0,05	3

Исследуемая территория на севере Байкитской антеклизы отвечает Куюмбинскому месторождению нефти Куюмбинско-Юрубчено-Тохомской зоны нефтегазонакопления. Вопрос об условиях формирования коллекторов на объекте является дискуссионным, однако в настоящей работе принята модель трещиноватого и трещиновато-кавернозного типов коллекторов (Конторович и др., 1996, Харахинов, Шленкин, 2011), связанных с развитием разрывных нарушений. В основном, залежи углеводородов сосредоточены не глубже 200 метров от предвенского несогласия на глубинах от поверхности Земли в среднем до 2300 метров и приурочены к трещинам и кавернам низкопористых доломитов среднерифейского возраста. Региональным флюидоупором служат сульфато-глинисто-карбонатные породы вендского возраста и галогенно-карбонатные породы усольской свиты нижнего кембрия (Харахинов, Шленкин, 2011). Карбонатные породы с низкой пористостью могут служить коллекторами промышленного значения при наличии в них открытых трещин. Таким образом, оценка интенсивности трещиноватости низкопористых карбонатных пород является важной задачей при поисково-разведочных работах в данном регионе. В настоящей работе представлен подход к прогнозу интенсивности трещиноватости горных пород, связанной с дилатационной дезинтегрированностью среды вдоль разрывных нарушений. В основу проведения предварительной оценки интенсивности трещиноватости карбонатных пород Куюмбинской территории легли данные только по сейсмическому горизонту R<sub>2</sub>, который располагается на глубинах от 3425 до 1930 метров вблизи подошвы токурской толщи среднерифейского комплекса (Москаленко, Хуснитдинов, 2017). Этот выбор обосновывается тем, что основные залежи углеводородов на Куюмбинском месторождении сосредоточены в верхних частях разреза рифейского комплекса, вблизи предвенского несогласия. В результате проведения анализа максимального скольжения и дилатации по разрывным нарушениям были построены карты условных вероятностей нахождения областей дилатации и повышенной компрессии на сейсмическом горизонте и выявлено, что наиболее перспективной областью для проведения дальнейших буровых работ и поиска трещиноватых коллекторов нефти является юго-западный участок сейсмического горизонта R<sub>2</sub>. Этот участок характеризуется повышенной

дилатационной дезинтегрированностью доломитов и на сегодняшний день не опробован бурением (в отличие от северо-западного участка). Однако, для получения более точных результатов по распределению в регионе открытых трещин, которые могут служить коллекторами нефти и газа, необходимо учитывать количественные характеристики литостатического и порового давления с прочностными характеристиками пород по скважинному материалу.

В результате применения структурно-геологического подхода определения индикатора тектонического напряжения, выделенного при анализе структурных карт сейсмических горизонтов  $R_4$ ,  $R_3$  и  $R_2$  на Куюмбинском объекте проведен анализ кинематических характеристик разрывных нарушений и произведена реконструкция параметров напряженно-деформированного состояния. Создана база данных по кинематике разрывных нарушений, содержащая ту же информацию, что и аналогичная база данных по Арчинскому объекту. Основные выводы сводятся к следующим пунктам:

- установлено, что кинематические характеристики разломов на горизонтах  $R_4$  и  $R_3$  содержат компоненты перемещения как по простиранию разлома (сдвиг), так и по падению (взброс или сброс) и в целом сходны между собой. Разломы на горизонте  $R_2$  содержат только сдвиговую компоненту. Изменение кинематических характеристик разломов связывается с событием, произошедшим в предвингольдинское время;
- установлено наличие двух этапов сдвиговых деформаций в ходе предвендской складчатости региона: первый этап деформаций с субмеридиональной осью сжатия и второй этап деформаций с субширотной осью максимального сжатия. Эти этапы коррелируются с тектоническими событиями, происходившими на юго-западной активной окраине Сибирской платформы;
- получена предварительная оценка интенсивности трещиноватости доломитов для сейсмического горизонта  $R_2$ , где показано, что наиболее перспективной областью для проведения дальнейших буровых работ и поиска трещиноватых коллекторов нефти является юго-западный участок сейсмического горизонта, так как он характеризуется повышенной дилатационной дезинтегрированностью доломитов и на сегодняшний день не опробован бурением;
- предложена модель тектонической эволюции региона с выделением стадий рифтогенеза, рифейского осадочного бассейна и предвендской складчатости.

На основе полученных результатов сформулировано *второе защищаемое положение*:

***На северном склоне Байкитской антеклизы Сибирской платформы выделяется два этапа сдвиговых деформаций в ходе предвендской складчатости: первый, характеризующийся субмеридиональной осью максимального сжатия и второй, при субширотной ориентировке оси максимального сжатия.***

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение подхода выделения вектора перемещения по разлому – индикатора тектонического напряжения при анализе структурных карт поверхностей сейсмических горизонтов МОВ ОГТ 3Д проводилось на Арчинском и Куюмбинском объектах, которые характеризуются различными геодинамическими обстановками. В ходе работы были разработаны основные положения выделения векторов перемещения по сейсмическим данным, критерии отбраковки векторов перемещения и структура исходной базы данных кинематических характеристик разрывных нарушений и приуроченных к ним векторов перемещения для дальнейшего расчета параметров напряженно-деформированного состояния. По результатам проведенной работы применения разработанного подхода было установлено:

- предложенный подход позволяет получать информацию о кинематике разломов и параметрах напряженно-деформированного состояния на основании изучения только геометрии поверхностей сейсмических горизонтов и приуроченных к ним поверхностей разрывных нарушений, не требуя дополнительного проведения буровых работ на исследуемом объекте;
- применение данного подхода допустимо только в том случае, когда формирование разрывных нарушений следует после процессов складкообразования на исследуемом объекте;
- анализ кинематических характеристик разломов при использовании данного подхода позволяет получать информацию о (1) кинематике разрывных нарушений (азимуты падения и простираения разлома и угол его падения, угол  $\alpha$  и тип перемещения по разрывному нарушению), (2) ориентировке векторов перемещения (азимут, угол погружения и угол наклона вектора перемещения в плоскости разлома (rake)) и (3) величине вектора перемещения (амплитуда полного перемещения);
- результаты анализа кинематических характеристик и реконструкции параметров напряженно-деформированного состояния позволяют выйти не только на тектоническую эволюцию исследуемого региона, но и на оценку развития систем трещиноватости связанной с полученным напряженным состоянием и, тем самым, возможность получения карт вероятностей распределения открытых и закрытых трещин на объекте, обладающих коллекторскими свойствами. Получение таковых результатов исключительно по сейсмическим данным МОВ ОГТ 3Д, без проведения дополнительного бурения скважин на объекте, является важным прикладным аспектом предложенного подхода, но для его корректной реализации необходимы дополнительные исследования.

На основе полученных результатов сформулировано третье защищаемое положение:

***Вектор перемещения, определенный при анализе структурных карт поверхностей сейсмических горизонтов МОВ ОГТ 3Д и разрывных нарушений, приуроченных к ним, является индикатором тектонического напряжения для расчета параметров напряженно-деформированного состояния и анализа кинематических характеристик по аналогии с определением данных результатов по зеркалам и бороздам скольжения в природных обнажениях.***

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК:*

1. **Москаленко А.Н.**, Худолей А.К., Жуков В.В., Демин В.Ю., Верин А.В. Реконструкция кинематических характеристик разрывных нарушений и поля палеонапряжений для Урмано-Арчинской площади // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2015, № 5, с. 1-16
2. **Москаленко А. Н.**, Худолей А.К., Хуснитдинов Р. Р. Реконструкция стресс состояний и тектонической эволюции северного склона Байкитской антеклизы Сибирской платформы по сейсмическим данным МОВ ОГТ 3Д // Геотектоника, 2017, № 3, с. 1-22
3. **Москаленко А.Н.**, Хуснитдинов Р.Р. Предварительная оценка интенсивности трещиноватости карбонатных пород Куюмбинского нефтяного месторождения // Вестник СПбГУ, Науки о Земле, 2017, 62 (3) с. 311-322

*Материалы и тезисы докладов научных конференций:*

4. **Москаленко А.Н.**, Нилов С.П. Реконструкция кинематических характеристик разрывных нарушений и поля палеонапряжений для Урмано-Арчинской площади (Нюрольская впадина) // Материалы XIII конференции студенческого научного общества «Геология в различных сферах», Санкт-Петербург, 2014, с. 104-105
5. **Москаленко А.Н.**, Нилов С.П. Реконструкция кинематических характеристик разрывных нарушений и поля палеонапряжений для Урмано-Арчинской площади (Нюрольская впадина) // Материалы XLVI Тектонического совещания, Москва: ГЕОС, 2014, том 2, с. 22-26
6. **Москаленко А.Н.**, Худолей А.К. Структурно-геологический метод определения кинематических характеристик разрывных нарушений и реконструкции стресс-состояния по сейсмическим данным МОВ ОГТ 3Д (на примере Арчинской площади, Нюрольская впадина) // Материалы XLVIII Тектонического совещания, Москва: ГЕОС, 2016, с. 28-31
7. **Москаленко А.Н.**, Худолей А.К. Структурно-геологический метод определения кинематических характеристик разрывных нарушений и реконструкции стресс-состояния по сейсмическим данным МОВ ОГТ 3Д // Материалы Всероссийской научно-практической молодежной конференции «Современный исследования в геологии», Санкт-Петербург, 2016, с. 68-69
8. **Москаленко А.Н.**, Худолей А.К., Сим Л.А., Хуснитдинов Р.Р. Реконструкция стресс-состояния северных районов Байкитской антеклизы и юга Курейской синеклизы на Куюмбинском месторождении // Материалы докладов четвертой тектонофизической конференции в ИФЗ РАН, 2016, с. 93-98
9. **Москаленко А.Н.**, Худолей А.К., Хуснитдинов Р.Р. Структурно-геологический метод определения кинематических характеристик разрывных нарушений и реконструкции стресс-состояния по сейсмическим данным МОВ ОГТ 3Д (на примере северного склона Байкитской антеклизы, юго-запад Сибирской платформы) // Материалы XLIX Тектонического совещания, посвященного 100-летию академика Ю.М. Пушаровского, Москва: ГЕОС, 2017, с. 28-33
10. **Москаленко А.Н.** Структурно-геологический метод определения кинематических характеристик разрывных нарушений и реконструкции стресс-состояния по сейсмическим данным МОВ ОГТ 3Д (на примере Арчинской площади, Западная Сибирь) // Материалы V Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной памяти академика А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, 2017, с. 94-96
11. **Moskalenko A.** Paleostress estimation by fault kinematic analysis based on 3D seismic data // Geological Society of America Abstracts with Programs, 2017, Vol. 49, No. 6

