



УДК 551.24.02+551.243

Исследование напряжённо-деформированного состояния Култукской депрессии Южного Байкала

А. А. Редькин (redkin@crust.irk.ru)

Аннотация. Методом поляризационно-оптического моделирования проведено исследование напряжённо-деформированного состояния Култукской депрессии южного Байкала. Получено: распределение максимальных касательных напряжений, траектории главных нормальных напряжений и типы подвижек по разрывам.

Ключевые слова: Култукская депрессия, напряжённо-деформированное состояние, модель, разрыв, напряжение, деформация.

Введение

Сейсмические исследования Байкальской впадины проводились тремя методами: ГСЗ (1968–1981) [6], одноканальным (1977–1982, 1989, 1990 и 1992) [3] и многоканальным сейсмопрофилированием (1992) [10]. По поперечным и продольным по отношению к Байкальской впадине профилям ГСЗ было установлено наличие подлитосферной линзы аномальной мантии со скоростями Р-волн 7,7–7,8 км/с, гребень которой расположен под Южной и Средней впадинами оз. Байкал [6; 3]. Методом ГСЗ определено, что мощность коры в Прибайкалье очень изменчива, особенно поперёк Байкальской впадины [6]. Отмечено уменьшение мощности коры на 17 км при переходе от Сибирской платформы к Байкальской впадине [6]. Методами одноканального сейсмопрофилирования детально установлен подводный рельеф байкальских впадин, а также исследована верхняя часть осадочной толщи мощностью 1,5 км. Методами многоканального сейсмопрофилирования исследована вся осадочная толща и рельеф фундамента всех впадин Байкала.

Сейсмопрофилированием определено, что:

1) Байкальская впадина имеет сложное строение дна, особенно на восточных и юго-восточных склонах (чередование крутых уступов и пологих террасовидных ступеней, сильная расчленённость);

2) в Байкальской впадине имеется повсеместная неоднородность вертикального профиля осадочной толщи, в которой выделено три сейсмокомплекса – различных по мощности, залеганию и строению слоёв осадков, являющихся аналогами танхойской, ановской и ахаликской свит (возраст соответственно: 34–3,6; 3,6–0,8 и от 0,8 млн лет) [10];

3) осадочная толща байкальских впадин нарушена и дислоцирована разломами, причём наибольшая степень нарушений и смещений характер-

на для среднего осадочного сейсмокомплекса – для него характерны многочисленные разрывы с амплитудами смещений десятки метров, в южном Байкале – складки северо-западного простирания.

По результатам обработки данных сейсмопрофилирования первоначально известные три котловины Байкала были разделены на ряд более мелких структурных элементов. Под тремя котловинами в данной статье понимаются не тектонические впадины, а батиметрически выраженные, разделённые поднятиями Селенгинским и Академическим котловины – северная, средняя и южная. Структурные элементы, являющиеся составными частями этих трёх котловин, выделяются по структурно-тектоническим особенностям и современной истории своего развития.

Наибольший интерес представляет Южно-Байкальская впадина, так как она имеет ряд существенных отличий от других впадин Байкала. В связи с этим представляет интерес исследование напряжённо-деформированного состояния, которое осуществлялось методом поляризационно-оптического моделирования. Напряжённо-деформированное состояние в данной работе оценивается с позиций анализа напряжений и деформаций.

Цель: исследовать напряжённо-деформированное состояние Култукской депрессии Южно-Байкальской впадины с помощью физического моделирования.

Задачи: 1. Определить распределение максимальных касательных напряжений и построить траектории главных нормальных напряжений в пределах Култукской впадины.

2. Проанализировать связь моделируемых параметров с параметрами сейсмичности (территориальное распределение разломов и эпицентров землетрясений) внутренней структуры впадины.

Структурно-тектонические особенности Южно-Байкальской впадины

Южно-Байкальская котловина – одна из трёх батиметрически выраженных котловин Байкала, занимающая его южную треть, которая расположена южнее дельты Селенги и отделена от Средней котловины Селенгинским горстом, верхняя часть которого сложена осадочными породами. Согласно К. Г. Леви [4; 13], Южно-Байкальская впадина делится на две депрессии – Култукскую и Мишихинскую. Култукская депрессия занимает западную часть Южно-Байкальской впадины (№ 1 на рис. 1). С северо-северо-запада она ограничена Обручевским разломом, с юго-запада – продолжением Главного Саянского разлома, с юга – разломами Черского, с северо-востока – Ангарским разломом. Мишихинская депрессия занимает восточную часть впадины (№ 2 на рис. 1). С северо-запада эта структура ограничена тем же Обручевским разломом, который восточнее мыса Кадильный уходит от краёв Байкальской впадины (рис. 1), с юго-запада – Ангарским разломом, с юго-востока – разломами Черского, с северо-востока – Боргой-Большереченским разломом, к востоку от которого разломы разворачиваются к субмеридиональной ориентировке.

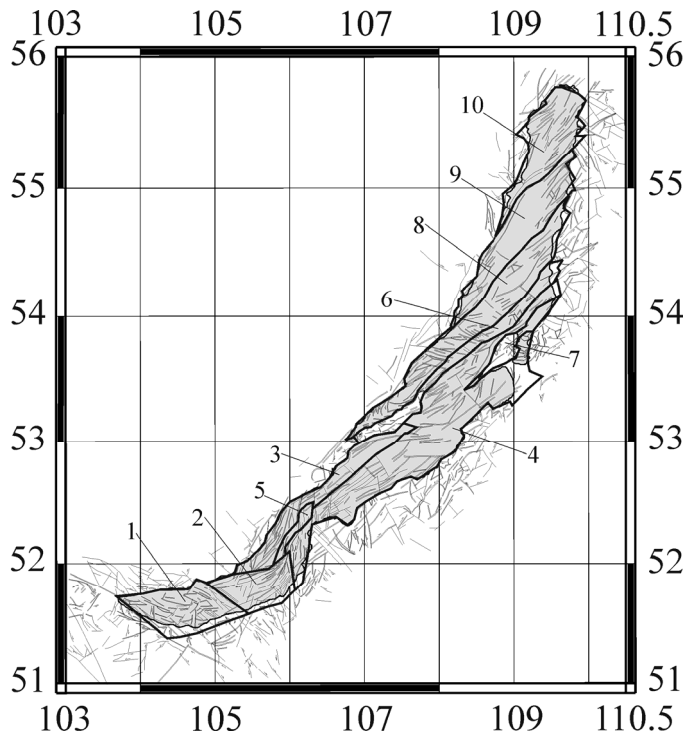


Рис. 1. Карта активных тектонических структур Байкальской впадины [13].

Цифрами на карте обозначены активные структуры Байкальской впадины: Южно-Байкальская впадина: 1 – Култукская, 2 – Мишихинская депрессии; Средне-Байкальская впадина: 3 – Приольхонский, 4 – Селенгино-Чивыркуйский грабены, 5 – горст Посольской банки; 6 – Ольхон-Академическое поднятие, 7 – Святоносское поднятие; Северо-Байкальская впадина: 8 – Маломорско-Езовская, 9 – Кедрово-Томпудинская, 10 – Рель-Кичерская депрессии

Чем так интересна Южно-Байкальская впадина по сравнению с двумя другими впадинами Байкала? С ней связано несколько принципиальных вопросов, ответы на которые существенно расширили бы знания тектоники Байкальского рифта.

Первый вопрос связан с тем, что структуры второго порядка в Южно-Байкальской впадине (Култукская и Мишихинская депрессии) имеют очень большие отличия между собой и одноранговыми структурами других впадин – Средне-Байкальской и Северо-Байкальской по нескольким критериям.

1. В Култукской депрессии установлены интенсивные складчатые деформации в среднем осадочном сейсмокомплексе – аналоге аносовской свиты позднеплиоценового – эоплейстоценового времени, которые не характерны для соседней Мишихинской депрессии, где отмечено мелкоблоковое строение осадочной толщи.

2. Эти две депрессии Южно-Байкальской впадины имеют различия в простирании рифтогенных структур – Култукская имеет субширотное их простирание, что выделяет её среди других одноранговых структур всех впадин Байкала, Мишихинская – северо-восточное, и это сближает её с другими частями Байкальской впадины.

3. Подавляющее большинство внутривпадинных разломов Мишихинской депрессии согласуются с простиранием её краевых разломов, параллельных между собой и контролирующих простирание этой депрессии. Большинство внутривпадинных разломов Култукской депрессии по простиранию согласуются с одним из четырёх её краевых разломов (чаще они параллельны разломам Черского и Ангарскому).

4. Обе впадины, составляющие Южно-Байкальскую, занимают на её площади всю ширину занимаемых ими отрезков Байкальской впадины (см. рис. 1), а граница между ними поперечна простиранию рифтовых структур.

В Средне-Байкальской впадине большинство разломов параллельны направлению простирания рифтовых впадин и их элементов второго порядка. В Северо-Байкальской впадине основная масса разломов имеет северо-восточное простирание и не согласуется с простиранием самой впадины (см. рис. 1). Её впадины второго порядка разграничиваются разломами северо-восточного простирания. Однако по простиранию разломов структуры Северо-Байкальской впадины очень похожи между собой и несравнимы со структурами Южно-Байкальской впадины по уровню современной тектонической активности.

Таким образом, только в Южно-Байкальской впадине составные элементы сильно отличаются между собой, в других впадинах этого не наблюдается. На этом фоне одна депрессия – Мишихинская – более сходна с другими структурами Байкальской впадины, а Култукская депрессия на их фоне сильно отличается.

Второй вопрос связан с резким изгибом простирания рифтогенных структур и изменением регионального поля напряжений.

1. Простирание рифтогенных структур Байкальской впадины к западу от Ангарского разлома изменяется с северо-восточного на субширотное (см. рис. 1).

2. Изменяется тип современного поля напряжений – в Южно-Байкальской впадине происходит переход от сбросового поля к сдвиговому [8; 5].

3. В осадочном теле Южно-Байкальской впадины отмечены складки СЗ простирания, которые ориентированы субперпендикулярно по отношению к установленному для района Южно-Байкальской впадины положению горизонтальной проекции оси сжатия, определённого на основе структурно-геологических исследований [12] и по данным GPS-измерений [5] и подтвержденному по расшифровкам механизмов очагов землетрясений [8].

Взаимная ориентировка оси сжатия – северо-восток 35° и складок – северо-западное простирание заставляет предположить, что складки в осадочном чехле Култукской депрессии являются складками сжатия. Но на

карте внутренние разломы северо-западного простирания показаны как сбросы. Таким образом, большинство разломов Култукской депрессии являются (?) сбросами, хотя они субпараллельны оси растяжения современного регионального поля напряжений.

Из двух депрессий южного Байкала, как обозначено в выше изложенных вопросах, Мишихинская депрессия является в большей степени типично рифтовой, чем Култукская. Простирание рифтовых структур, положение осей главных нормальных напряжений, внутреннее строение этой впадины подтверждают это. Все поставленные проблемы в большей степени относятся к Култукской депрессии. Поэтому именно разломы этой депрессии вызвали наибольший интерес и были выбраны в качестве объекта для моделирования.

Исследование напряжённо-деформированного состояния Култукской депрессии

В Култукской депрессии, как было отмечено, существует четыре крупных разлома, которые образуют её контур. Эти разломы – Главный Саянский, Обручевский, Черского и Ангарский – в силу своей морфологической выраженности (протяженность десятки-сотни километров), километровые амплитуды смещений, являются глубинными и влияют на активизацию локальных разломов Култукской депрессии. Существование и развитие внутренних разломов Култукской депрессии не случайно. На какую глубину проникают эти разломы, какой масштаб зоны динамического влияния они имеют, это вопрос на который однозначно ответить пока невозможно.

Южно-Байкальская впадина, в частности Култукская депрессия, является высокосейсмичной зоной [2; 8], что свидетельствует о современной активности её разломов. Причём сейсмичность сосредоточена как в краевых, так и во внутренних областях этой депрессии (рис. 2).

В Култукской депрессии имеется несколько областей (кластеров) концентрации сейсмической активности. Самый крупный из них расположен в восточной части Култукской депрессии – к нему приурочено второе по силе землетрясение из всех зарегистрированных за период наблюдений в Южно-Байкальской впадине. В зоне локализации этого кластера сходятся разломы трёх основных типов простираний – система Ангарского разлома, система разломов Черского и СВ система (см. рис. 2). Второй крупный кластер расположен на западе депрессии и связан с разломами системы Главного Саянского. Именно к нему приурочено самое сильное из зарегистрированных в Южно-Байкальской впадине землетрясений – Култукское (27.08.2008). Третий крупный кластер расположен в центре депрессии и приурочен к зоне стыка системы разломов Главного Саянского и правого сдвига СВ простирания. Четвёртый кластер расположен на юге депрессии в зоне пересечения систем разломов Черского, Главного Саянского и разломов СВ простирания.

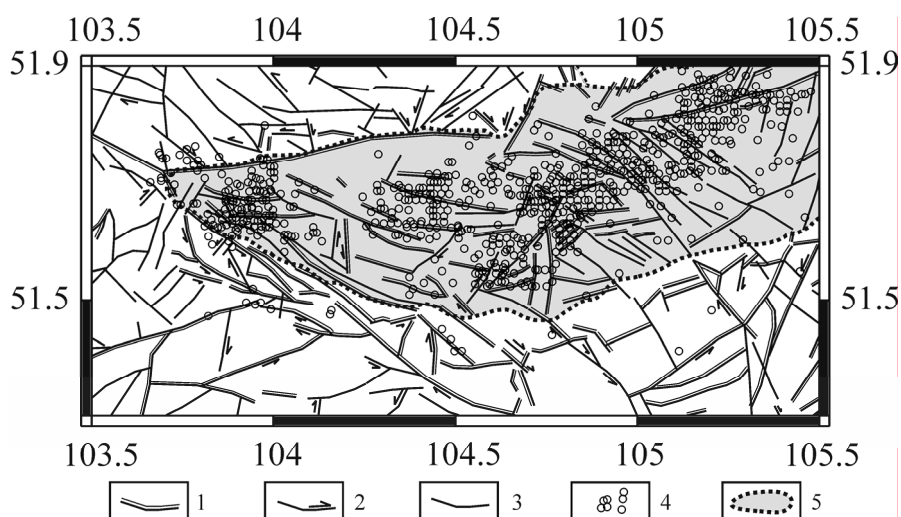


Рис. 2. Разломная структура Култукской депрессии Южного Байкала [13]:
1 – сбросы, 2 – сдвиги, 3 – разломы с неустановленным типом подвижки; 4 – здесь
и на других рисунках – эпицентры землетрясений; 5 – контур Байкала

Для определения влияния подвижек по региональным разломам, формирующим структуру Култукской впадины оз. Байкал, на распределение и концентрацию максимальных касательных напряжений внутри депрессии и на прилегающих к ней территориях и ориентацию главных нормальных напряжений внутри впадины, было проведено несколько серий физических экспериментов на упругих материалах методом поляризационно-оптического моделирования.

Методика

Модель представляет собой прямоугольный параллелепипед из оптически активного материала (желатина) с нанесёнными на него разрывами, имитирующими тектонические разломы. Под действием внешней нагрузки происходят подвижки по разломам и деформация окружающего их пространства. При прохождении через модель поляризованного света наблюдается картина цветных и тёмных полос (изохром и изоклин), отражающая её напряжённо-деформированное состояние.

Поляризационно-оптическое моделирование производилось на экспериментальной установке, которая была спроектирована и изготовлена в лаборатории современной геодинамики Института земной коры.

Перед экспериментом производилась градуировка модели, в результате которой определялась зависимость двойного лучепреломления (R) от величины максимальных касательных напряжений (τ_{\max}). Картина изохром, отражающая распределение значений максимальных касательных напряжений, фиксировалась на цифровой фотоаппарат. Нас интересуют не абсолютные значения максимальных касательных напряжений, а их относи-

тельные величины, которые выражаются в коэффициентах концентрации (K_τ). Они вычисляются по формуле $K_\tau = \frac{\tau_{\max}^i}{\tau_{\max}^0}$, где τ_{\max}^0 – значение максимальных касательных напряжений в модели без разрывов, τ_{\max}^i – значение напряжений в исследуемой точке модели.

В эксперименте исследуется плоское напряжённо-деформированное состояние Култукской депрессии, возникающее в результате активизации и взаимодействия разломов, составляющих впадину, под воздействием регионального поля напряжений. Эксперименты проводились по методике, разработанной Д. Н. Осокиной в Институте физики Земли [7].

Исследуемые параметры модели: распределение максимальных касательных напряжений, ориентации главных нормальных напряжений в окрестностях взаимодействующих разрывов и подвижки по ним. При интерпретации картины распределения максимальных касательных напряжений были выделены три области, отличающиеся по величине коэффициента концентрации (K_τ): области с сильным увеличением максимальных касательных напряжений (им соответствуют значения коэффициента $K_\tau = 1,5$ –2 и более); области со слабым увеличением напряжений ($K_\tau = 1,2$ –1,5); области с уменьшением максимальных касательных напряжений ($K_\tau = 0,5$ –0,8). Траектории главных нормальных напряжений проводились по изоклинам способом штрихов. Положение изоклин фиксировалось синхронным вращением скрещенных поляризатора и анализатора через каждые 10° . Тип и интенсивность подвижек по разломам определялись по размерам и форме областей концентрации максимальных касательных напряжений вблизи концов разрывов [9].

Обоснование схемы эксперимента

В качестве моделируемого объекта в экспериментах выступает Култукская депрессия, ограниченная четырьмя граничными разрывами, о которых было сказано выше. В эксперименте депрессия рассматривается как однородный объект, не имеющий внутренних дефектов, осложняющих её строение. В экспериментах определялись параметры напряжений и деформаций, создаваемые на территории депрессии и за её пределами, граничными разломами: Обручевским, имеющим среднее простирание 80° , Черского – простирание 75° , Главным Саянским – простирание 290° и Ангарским – простирание 330° . Названия разломов и их простирание взято по данным [4; 13]. Три из них выражены в рельефе уступами с амплитудой в несколько километров. И только Ангарский разлом в акватории Байкала в рельефе выражен слабо, но его структурообразующая роль не подлежит сомнению. Эти разрывы, как и вся впадина, являются объектами моделирования, поскольку они имеют большие масштабы и являются впадинообразующими. В действительности они имеют сложное строение и не являются одноранговыми между собой по морфометрическим и деформацион-

ным параметрам, а также сильно отличаются морфологически. Главный Саянский разлом – крупнейший генеральный (по классификации С. И. Шермана) шов, известная протяжённость которого составляет тысячу километров. Разлом заходит на исследуемую территорию лишь на 50–55 км своего юго-восточного окончания. Обручевский разлом, согласно карте разломов К. Г. Леви, представляет собой кулису одноимённой генеральной системы разломов Обручевского сброса, которая является границей Сибирской платформы и складчатых областей. Разлом Черского представляет собой уже не генеральный, а региональный разлом, который имеет протяжённость значительно более 100 км и не образует единой линейной структуры, а состоит из большого числа кулис небольшой протяжённости. Ангарский разлом также является региональным разломом, уходящим далеко в глубь Сибирской платформы, также состоит из субпараллельных кулис, заходящих друг за друга.

В схеме моделирования сжатие было задано по азимуту 25° . Такое положение оси было определено для южного Байкала по структурно-геологическим данным [12], которые подтверждаются результатами GPS-измерений [5]. Задаваемая величина нагрузки позволяла воспроизвести плоское напряжённое состояние [11]. При составлении схемы моделирования в качестве подложки использовалась карта активных разломов Прибайкалья [4, 13]. На схеме моделирования все четыре разлома представляют собой прямые линии, которые отражают осреднённое простирание разломов. Угловые взаимоотношения сочленений разрывов соответствуют тем, что на карте. Разрывы Ангарский и Главный Саянский были заданы более длинными, чем Обручевский и Черского, чтобы увеличить подвижку по ним. Они были продлены на северо-запад за пределы Култукской депрессии, как это существует в реальности. У разрывов Обручевский и Черского были заданы только те участки, которые расположены в пределах Култукской депрессии. В трёх сочленениях из четырёх разрывы не соединяются между собой и в одном сочленении они были соединены. Если все четыре разрыва соединить между собой, то мы не сможем получить удовлетворяющие нас результаты. В этом случае внутреннее поле Култукской депрессии будет представлять собой вычлененный разломами блок, в котором напряжения будут минимальными или отсутствовать. Кроме того, если разрывы не соединены между собой, мы можем получать информацию о величине и типе подвижки, наблюдая форму концевых максимумов изохром. Сочленяющиеся разрывы взаимодействуют в одном случае под острыми углами (сочленения Главного Саянского и Обручевского – 42° , Ангарского и Черского разломов – 54°), в другом – под тупыми (сочленения Обручевского и Ангарского – 132° , Главного Саянского и Черского разломов – 132°). При этом два разрыва, взаимодействующие под тупым углом, могут работать вместе как один разрыв. Поэтому в одном из двух тупых углов – на сочленении разрывов Главного Саянского и Черского – они были соединены.

Результаты моделирования

Активность разломов и подвижки по ним

Подвижки по разрывам, определённые по результатам моделирования, показаны на рис. 3. В исследуемой модели разрывы Главный Саянский, Черского, Обручевский характеризуются левосторонней подвижкой, Ангарский имеет правостороннюю сдвиговую подвижку. Максимальной активностью характеризуются разрывы ССВ простирания – Обручевский и Черского, минимальной – СЗ простирания – Ангарский и Главный Саянский. Разрывы Обручевский и Черского являются чистыми сдвигами. Разрывы Ангарский и Главный Саянский испытывают поджатие бортов, причём составляющая сжатия у этих разломов доминирует над сдвиговой. У северной части Ангарского разрыва сдвиговая подвижка больше, чем у южной. Это вызвано тем, что северный конец этого разрыва является свободным, а южный упирается в напряжённую область на сочленении разрывов Черского и Ангарский, которая гасит его подвижку на южном конце. Наиболее интересная ситуация наблюдается с подвижками по Главному Саянскому разрыву. Положение разрыва по отношению к сжатию благоприятствует реализации по нему правосдвиговой подвижки. В действительности разлом практически зажат и в северной его части отмечается крайне незначительная левая подвижка. Сдвиговая подвижка по разлому Черского на его сочленении с Главным Саянским резко уменьшается. На сочленении разрывов Главный Саянский и Черского непосредственно вблизи их концов наблюдается раздвижение бортов у обоих разрывов.

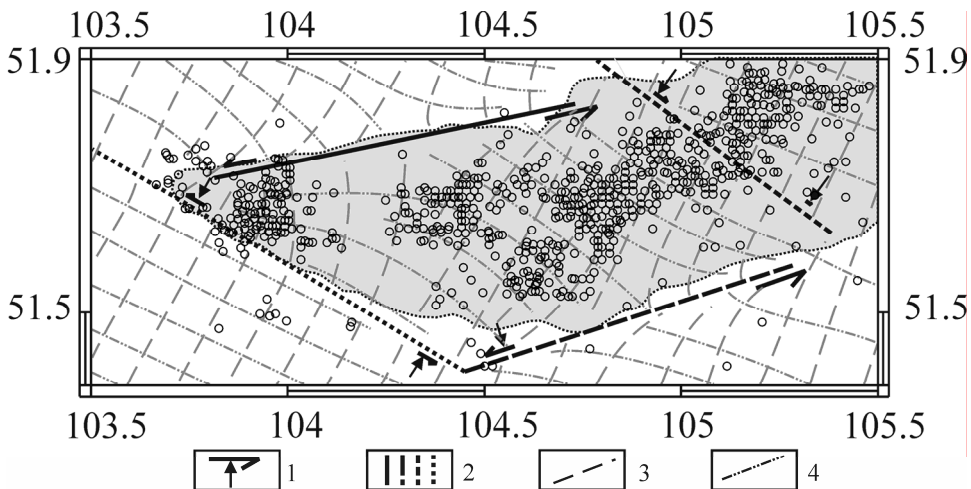


Рис. 3. Схема подвижек по разрывам и траектории главных нормальных напряжений.

Цифрами обозначены: 1 – направление сдвигового смещения и поджатие бортов разрыва, больший по размерам значок – большая интенсивность подвижки; 2 – моделируемые разрывы, чем короче пунктир, тем слабее активность разрыва; траектории главных нормальных напряжений: 3 – сжатия, 4 – растяжения

Траектории главных нормальных напряжений

На модели ось сжатия регионального поля напряжений в Култукской депрессии ориентирована на СВ, ось растяжения – на СЗ. На рис. 3 видно, что искривления траекторий главных нормальных напряжений наблюдаются во всех четырёх угловых частях впадины, а также вблизи разрывов Обручевский и Черского. Это связано с тем, что в углах впадины и вблизи наиболее активных разрывов – Обручевского и Черского происходят наиболее интенсивные деформации материала модели и напряжённое состояние здесь в целом отличается от того, что наблюдается в центральной части депрессии и за её пределами. Вблизи разрывов СЗ простирания – Обручевского и Черского траектории почти не изменяют своего положения.

В СЗ части впадины вблизи сочленения разрывов Главный Саянский и Обручевский сжатие имеет субмеридиональную ориентировку на С, растяжение на З. В СВ части – сжатие вблизи сочленения разрывов Обручевский и Ангарский ориентировано на СВ, растяжение – на СЗ. В ЮВ углу вблизи сочленения разрывов Черского и Ангарский сжатие ориентировано на С, растяжение – на З. В ЮЗ углу вблизи сочленения разрывов Черского и Главный Саянский сжатие ориентировано на СВ, растяжение на СЗ.

При СВ ориентировке сжатия и СЗ ориентировке растяжения, в модели локальные разрывы СВ ориентировки являются сбросами, СЗ ориентировки – взбросами, субширотной и субмеридиональной ориентировки – сдвигами.

Максимальные касательные напряжения

Распределение и концентрация максимальных касательных напряжений по результатам моделирования показаны на рис. 4. На территории Култукской депрессии выделяются три качественно различные между собой, близкие по площади напряжённые области – область увеличения максимальных касательных напряжений в западной части депрессии, область уменьшения напряжений в центральной части впадины и область повышения напряжений в восточной части депрессии. В напряжённой области на западе Култукской депрессии, которая вытянута вдоль Главного Саянского разрыва, выделяются два максимума с сильным увеличением напряжений – значение $K_{\tau} > 1,5$. Один из них расположен в СЗ углу впадины, на сочленении разрывов Главный Саянский и Обручевский. Он выражен по обе стороны Главного Саянского разрыва как в Култукской депрессии, так и за её пределами. Второй максимум в западной части Култукской депрессии со значительным увеличением напряжений расположен в ЮЗ углу впадины на сочленении разрывов Главный Саянский и Черского. Он тоже локализуется в Култукской депрессии и за её пределами. В напряжённой области на западе депрессии имеется область относительного ослабления напряжений – значения $K_{\tau} = 1,2-1,5$, которая прилегает к среднему отрезку Главного Саянского разрыва. Восточная напряжённая область также имеет два максимума с сильным увеличением напряжений – значения $K_{\tau} > 1,5$.

Максимум в СВ углу впадины на сочленении разрывов Обручевского и Ангарского вызван деформациями в результате движения по Обручевскому разрыву. Максимум в ЮВ углу Култукской впадины на сочленении разрывов Ангарский и Черского вызван деформациями в результате движения по разрыву Черского. В восточной области увеличения напряжений наблюдается область относительного ослабления напряжений – значение $K_\tau = 1,2-1,5$. В центральной области с уменьшением напряжений наблюдаются два минимума напряжений – значение $K_\tau < 0,7$. Один расположен на севере впадины, вблизи среднего отрезка Обручевского разрыва, другой – в Ю-ЮВ части, вблизи среднего отрезка разрыва Черского. Между ними в центре впадины наблюдается область со слабым увеличением напряжений – значение $K_\tau = 1,2-1,5$, которая вытянута в северо-восточном направлении.

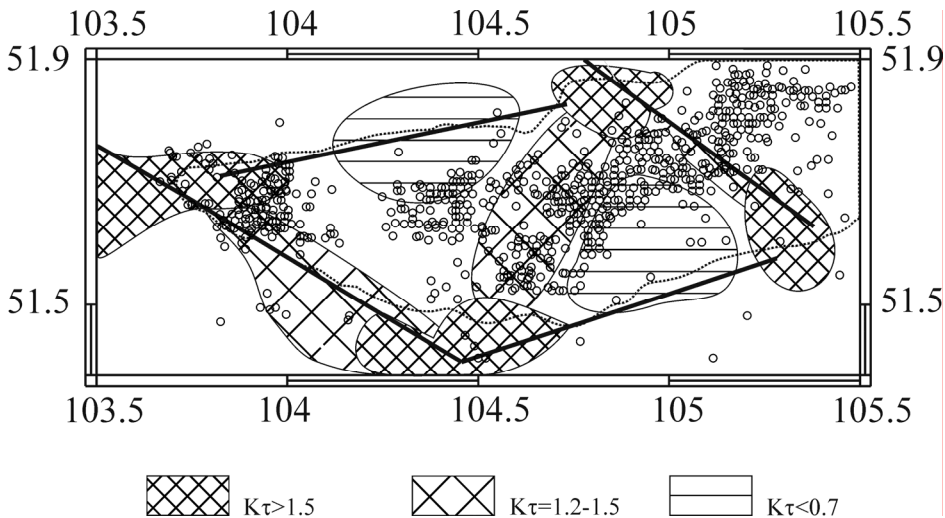


Рис. 4. Распределение областей максимальных касательных напряжений. Значения максимальных касательных напряжений в коэффициентах. Пояснения даны в тексте

В СЗ части Култукской депрессии создаётся локальное поле растягивающих напряжений за счёт перемещения материала в результате левосторонних смещений вдоль Обручевского разрыва к востоку. В СВ части депрессии за счёт нагнетания материала в результате левосторонних смещений вдоль Обручевского разрыва и в результате правосторонних смещений вдоль Ангарского разрыва образуется локальное поле напряжений сжатия. В ЮЗ части локальное поле сжатия обусловлено нагнетанием материала в результате левосторонних перемещений материала вдоль второго по интенсивности подвижки разрыва – Черского. Локальное поле растягивающих напряжений в ЮВ части возникает из-за оттока из неё материала в результате активных левосторонних перемещений вдоль разрыва Черского.

Концентрация эпицентров землетрясений, наблюдаемая в СЗ углу Култукской депрессии, связана с областью сильного увеличения напряже-

ний. Именно в этом районе произошло самое сильное из инструментально зарегистрированных землетрясений в южном Байкале – Култукское (27.08.2008). Вторая крупная концентрация эпицентров землетрясений, расположенная ближе к восточному краю от центра впадины связана с центральной областью небольшого увеличения напряжений.

Обсуждение результатов

Новые данные, полученные в результате моделирования, позволили детально охарактеризовать напряжённо-деформированное состояние Култукской депрессии. В Култукской депрессии по результатам моделирования выделилось пять областей с разным типом деформирования материала. Интересен тот факт, что в каждом из четырёх сочленений, попарно схожих между собой по геометрическим характеристикам, наблюдается индивидуальная картина деформаций. В ЮЗ и СВ частях депрессии наблюдается сжатие, но при этом в СВ углу оно имеет двусторонний характер, т. е. оно нагнетается движением материала вдоль двух разрывов, а в ЮЗ углу сжатие носит односторонний характер и вызвано нагнетанием материала вдоль разрыва Черского. В СЗ и ЮВ углах впадины наблюдается растяжение. При этом в ЮВ углу оно имеет двусторонний характер, а в СЗ – односторонний с неравномерным вращением материала по часовой стрелке. В центральной части депрессии отмечены сдвиговые деформации и вращения материала по часовой стрелке. В зонах интенсивных деформаций – в областях сочленения разрывов и в областях, прилегающих к разрывам Обручевский и Черского, траектории сжатия и растяжения отличаются от ориентировки сжатия и растяжения, заданных в граничных условиях эксперимента. Вблизи краёв средних отрезков разрывов Ангарский и Главный Саянский траектории главных нормальных напряжений почти не отличаются от заданной по условиям эксперимента ориентировки сжатия и растяжения. Разрывы Обручевский и Черского имеют большое деформационное поле, в то время как у разрывов Главный Саянский и Ангарский оно фактически ограничивается их бортами.

При сопоставлении траекторий главных нормальных напряжений на территории Култукской депрессии, полученных по данным моделирования и типов подвижек разломов, показанных на карте, отмечается следующее: СВ система сбросов простирается вкрест к траекториям растяжения, то есть она подтверждается результатами моделирования; разломы системы Ангарского также простираются вкрест к траекториям сжатия, что тоже согласуется с данными [4], где отмечено, что Ангарский разлом является правым сдвиго-сбросом.

Сейсмичность наблюдается в четырёх из пяти областей, различающихся по типам деформаций. Она присутствует в СЗ, СВ, ЮЗ углах и в центре впадины. В СЗ части впадины она связана с образованием сбросов, оперяющих Главный Саянский разлом. Особенностью сейсмичности СЗ угла депрессии является то, что основная масса землетрясений здесь связа-

на с сильными сейсмическими событиями, т. е. являются форшоками и афтершоками сильных землетрясений. То скопление, которое видно на рис. 2, 3, связано с Култукским землетрясением. Механизм очага Култукского землетрясения имел сбросовую подвижку [1]. В СВ части впадины землетрясения связаны с образованием сбросов (взбросов), оперяющих Ангарский разлом, а также левых сдвигов СВ простирания. Большую роль в их генерации играют сбросы, поскольку они, согласно модели, приурочены к области, где напряжения имеют большие значения, чем сдвиги, которые приурочены к области со слабым увеличением напряжений. Основная масса землетрясений в этой области имеет сбросовые подвижки [8]. Выше было отмечено, что Обручевский разрыв является самым активным из всех (рис. 5) и, что в северном отрезке Ангарского разлома подвижка имеет большую интенсивность, чем в южном; следовательно, в СВ части впадины локальное поле напряжений сжатия будет наиболее ярко выражено. Образование сдвигов СВ ориентировки обуславливается оттоком материала из локальной области сжатия. Левая составляющая этих локальных сдвигов определяется тем, что поскольку нагнетание материала вдоль Обручевского разрыва более интенсивное, чем вдоль Ангарского разрыва, его отток тоже будет происходить интенсивнее. Особенностью сейсмичности этой области со слабым увеличением напряжений является то, что сейсмичность этого региона более рассредоточена по территории и во времени. Землетрясения в центре впадины связаны со сдвиговыми разломами ВСВ и ССВ простирания. В этой области не обнаруживается явного доминирования ни механизмов сжатия, ни растяжения, ни сдвига [8]. В ЮЗ углу сейсмичность, согласно модели, связана с образованием и развитием левых сбросо-сдвигов СВ простирания. В ЮВ углу впадины землетрясения не наблюдаются.

Выводы

1. С помощью поляризационно-оптического моделирования проведено исследование напряжённо-деформированного состояния Култукской депрессии Южного Байкала, в результате которого получены: распределение максимальных касательных напряжений и траектории главных нормальных напряжений на всю территорию депрессии, а также тип сдвиговой подвижки по моделируемым разрывам.

2. Кинематический тип сдвиговых подвижек по моделируемым разрывам следующий: Главный Саянский – левый сдвиг, Обручевский – левый сдвиг, Ангарский – правый сдвиг, Черского – левый сдвиг; эти данные находятся в соответствии с данными карты активных разломов К. Г. Леви [4; 13] и подтверждены данными геолого-структурного анализа.

3. Траектории главных нормальных напряжений сжатия имеют СВ ориентировку, а траектории растяжения – СЗ.

4. Области сильного увеличения максимальных касательных напряжений в Култукской депрессии расположены на сочленениях разломов;

область слабого увеличения напряжений расположена в центре депрессии и вытянута в СВ направлении; области уменьшения напряжений прилегают к средним отрезкам двух самых активных разломов – Обручевского и Черского.

5. По результатам моделирования подтверждается система сбросов СВ простирания и взбросовая компонента в подвижке Ангарского разрыва.

6. В Култукской депрессии сейсмичность приурочена к областям с сильным и слабым увеличением напряжений.

Список литературы

1. Предварительные результаты эпицентральных наблюдений Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. / С. С. Арефьев [и др.] // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2008. – Т. 35, № 4. – С. 5–15.

2. Байкальский филиал геофизической службы : офиц. сайт. – URL: www.seisbukl.ru (дата обращения 19.03.2012).

3. Геолого-геофизические и подводные исследования озера Байкал / отв. ред. А. С. Монин. Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова. – М., 1979. – 158 с.

4. Активная тектоника Байкала / К. Г. Леви [и др.] // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 36, № 10. – С. 154–163.

5. Новые данные о современных тектонических деформациях южного горного обрамления Сибирской платформы / А. В. Лухнёв [и др.] // Докл. РАН. – 2003. – Т. 389, № 1. – С. 100–103.

6. Недра Байкала (по сейсмическим данным) / отв. ред. Н. Н. Пузырев. – Н. : Наука, 1981. – 104 с.

7. Осокина Д. Н. Метод моделирования локальных полей напряжений в окрестностях тектонических разрывов и в очагах землетрясений / Д. Н. Осокина, Н. Ю. Цветкова // Поля напряжений и деформаций в литосфере. – М. : Наука, 1979. – С. 139–162.

8. Сейсмичность и сеймотектонические деформации земной коры Южно-Байкальской впадины / Н. А. Радзиминович [и др.] // Физика Земли. – 2006. – № 11. – С. 44–62.

9. Позднекайнозойское напряженное состояние земной коры Прихубсугулья (Северная Монголия) по натурным и экспериментальным данным / В. А. Саньков [и др.] // Геотектоника. – 2004. – № 2. – С. 78–90.

10. Особенности строения осадочной толщи оз. Байкал по результатам многоканальной сейсмической съемки (1989) / Д. Р. Хатчинсон [и др.] // Геология и геофизика. – 1993. – Т. 34, № 10–11. – С. 25–36.

11. Шерман С. И. Оценка потенциальной сеймотектонической активности района Спитакского землетрясения по результатам моделирования / С. И. Шерман, А. Н. Адамович, А. И. Мирошниченко // Геоэкология. Инж. геология. Гидрогеология. Геокриология. – 1993. – № 2. – С. 66–78.

12. Шерман С. И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения / С. И. Шерман, Ю. И. Днепровский. – Новосибирск : Наука, 1989. – 156 с.

13. Active faults of the Baikal depression / Kirill G. Levi [et al.] // Bull. Centre Rech. Elf Explor. Prod. – 1997. – Vol. 21, N 2. – P. 399–434.

The Stress-Strain State Investigation of Kultuk Depression Southern Baikal

A. A. Redkin

Annotaton. The stress-strain state investigation by the polarization-optical modeling method has been studied. The maximum shear stress distribution, trajectories of the principal normal stresses and types of movements along faults have been found.

Key words: Kultuk depression, stress-strain state, model, fault, stress, deformation.

Редькин Алексей Андреевич
аспирант
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова 128
тел.: (3952) 42-58-60

Redkin Aleksey Andreevich
Post-Graduate Student
Institute of the Earth's crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952) 42-58-60