

АШУРКОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**СОВРЕМЕННАЯ КИНЕМАТИКА АМУРСКОЙ ПЛИТЫ ПО ДАННЫМ
GPS ГЕОДЕЗИИ И ДЕФОРМАЦИИ НА ЕЕ СЕВЕРНОЙ
ГРАНИЦЕ**

Специальность 25.00.03 – геотектоника и геодинамика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте земной коры Сибирского отделения РАН

Научный руководитель: Кандидат геолого-минералогических наук
В.А. Саньков

Официальные оппоненты: Доктор геолого-минералогических наук,
профессор В.С. Имаев

Кандидат физико-математических наук
А.В. Зубович

Ведущая организация: Институт нефтегазовой геологии и
геофизики СО РАН им. А.А.Трофимука

Защита состоится: “ 18 ” января 2011 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Диссертационного совета Д 003.022.02 в Институте земной коры СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, в конференц-зале

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института земной коры СО РАН.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу ученому секретарю совета к.г.- м.н. Юрию Витальевичу Меньшагину, men@crust.irk.ru

Автореферат разослан “ 17 ” декабря 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук

Меньшагин Ю.В

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из наиболее обсуждаемых проблем современной геодинамики Северо-Восточной Азии является вопрос о выделении Амурской плиты в отдельную, независимую от Евразии тектоническую единицу. Обсуждается как само ее существование, так и положение ее границ. Основываясь на распределении эпицентров землетрясений, Л.П. Зоненшайн с соавторами [Зоненшайн и др., 1978, 1979а, 1979б; Zonenshain, Savostin, 1981] впервые предложили границы нового блока литосферы – Амурской плиты, выделившегося как тектоническая единица на позднекайнозойском этапе развития. Несмотря на большое количество опубликованных работ, до сих пор нет единого мнения относительно существования такой плиты и положения ее границ. Решение дискутируемых вопросов осложняется как сравнительно редкой и слабой сейсмичностью, так и часто геоморфологической и структурной невыразительностью границ Амурской плиты. В течение долгого времени определение кинематики литосферных плит осуществлялось с помощью палеомагнитных, палеоклиматических, геологических, геоморфологических, сейсмологических методов исследования, регистрирующих следствия взаимодействия плит и их движений. В последние десятилетия активно развиваются средства и методы космической геодезии, позволяющие с высокой точностью определять местоположение объектов на поверхности Земли. Изменения во времени положения таких объектов говорит нам об их кинематических характеристиках. Система спутникового позиционирования GPS, на данный момент, является наиболее развитой среди подобных систем. Она обладает необходимой разрешающей способностью для количественной оценки широкого спектра геологических процессов. Применение методов спутниковой геодезии дало возможность нового подхода к определению параметров движения литосферных плит. Были построены новые модели мгновенной кинематики плит [Drewes, Angermann, 2001; Sella et al., 2002; Kreemer et al., 2003; Prawirodirdjo, Bock, 2004]. В глобальной модели движения плит Амурская плита была впервые выделена в работе [Kreemer et al., 2003]. В рамках региональных моделей по геодезическим данным Амурскую плиту выделяли в работах [Heki et al., 1999; Apel et al. 2006; Calais et al., 2006; Hsu et al., 2006; Jin et al., 2007; Shestakov et al., 2008; Тимофеев и др., 2008]. Полученные результаты сильно разнятся, поскольку основаны на разных наборах исходных данных. На сегодняшний день территория Амурской плиты покрыта редкой сетью пунктов наблюдения, а пространственное их распределение неравномерно. Неразрешенный вопрос о границах объекта исследования определяет и разный набор исходных данных. Таким образом, организация геодинамических наблюдений методами спутниковой геодезии на территории Амурской плиты, в Нижне-Зейской впадине, и определение кинематических характеристик плиты явились крайне актуальными задачами. Кроме того, закономерности протекания деформационных процессов на межплитных границах во внутриконтинентальных условиях, в зависимости от их

кинематических характеристик, являются недостаточно изученными и представляют большой научный интерес.

Цель работы: Оценка современной кинематики Амурской плиты и выявление закономерностей формирования внутриконтинентальных деформаций на примере ее границы с Северной Евразией.

Основные задачи исследования:

1) Организация геодинимического полигона и проведение периодических измерений методом GPS на территории Нижне-Зейской впадины.

2) Расчет поля современных горизонтальных скоростей движений по данным GPS измерений на территории Нижне-Зейской впадины.

3) Определение параметров движения Амурской и Евразийской плит и статистическая оценка независимости Амурской плиты.

4) Определение положения восточной границы Амурской плиты на основе данных о современной блоковой кинематике.

5) Верификация полученных результатов с использованием опубликованных данных геолого-геофизических исследований.

Научная новизна:

1) Определены параметры движения Амурской плиты на основе, впервые полученного, поля скоростей современных горизонтальных смещений для территории Нижне-Зейской впадины, являющейся неотъемлемой частью Амурской плиты.

2) Статистически обоснована восточная граница Амурской плиты

Фактический материал, аппаратура и личный вклад автора.

В основу диссертационной работы положены материалы GPS наблюдений на Амуро-Зейском геодинимическом полигоне, проведенных автором вместе с сотрудниками лаборатории современной геодинимики Института земной коры СО РАН и коллегами из Института геологии и природопользования ДВО РАН г. Благовещенск в период с 2001 по 2007 гг. Кроме того, были использованы данные GPS наблюдений в г. Улан-Удэ, а также данные постоянных станций международной геодинимической сети IGS, находящиеся в свободном доступе в центре хранения и обработки GPS данных SOPAC. Экспериментальные данные были получены с помощью двухчастотных приемников Ashtech Z-12 и Ashtech Z-Xtreme. Обработка GPS данных производилась автором лично, с использованием ряда программных средств: NOSE, TEQC, Ashtech Solution, GAMIT/GLOBK. Для визуализации полученных результатов применялся пакет программ GMT [Wessel, Smith, 2007]. Расчет слип-векторов механизмов очагов землетрясений выполнялся с помощью программы RAKE. Используемые автором программы работают под управлением операционных систем OpenSuse семейства Linux и Windows.

Защищаемые положения.

1) На основе измерений методом GPS геодезии на Амуро-Зейском геодинимическом полигоне показано, что Нижне-Зейская впадина тектонически стабильна и является неотъемлемой частью Амурской плиты. Восточная граница Амурской плиты проходит по системе разломов Тан-Лу, которая на современном этапе имеет правостороннюю сдвиговую кинематику.

2) Движения Амурской и Евразийской плит являются независимыми и определяют характер современных деформаций на границе этих плит. Полюс вращения Амурской плиты относительно Евразийской получен в районе с координатами 122.285 ± 0.73 в.д., 58.950 ± 0.52 с.ш. Угловая скорость составляет 0.095 ± 0.003 град./млн. лет.

Практическое значение.

Результаты проведенных исследований, как и сами данные GPS измерений, могут быть использованы: для определения кинематики литосферных плит; для выявления и уточнения их границ, в зоне влияния которых, как правило, расположены очаги сильнейших землетрясений; для выделения систем главных разломов и наиболее сейсмоопасных зон; для слежения за ходом изменения напряженно-деформированного состояния среды и накоплением упругих деформаций в зонах таких разломов. Полученные высокоточные координаты могут служить основой для повышения точности рядовых геодезических пунктов, что имеет большое значение в практической деятельности (картографические, кадастровые, инженерно-изыскательские, дорожно-строительные работы).

Апробация работы и публикации. Основные результаты докладывались на российских и международных конференциях: «Методика GPS измерений и обработки» 2003, г. Бишкек; V Байкальская молодежная школа-семинар «Геофизика на пороге третьего тысячелетия» 2004, г. Иркутск – п. Черноруд; «ГЕО-Сибирь-2006», г. Новосибирск; III Сибирская конференции молодых ученых по наукам о Земле, 2006, г. Новосибирск; «Тектоника и металлогения Северной Циркум – Пацифики и Восточной Азии», 2007, г. Хабаровск; «Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы», 2008, г. Бишкек; 23 Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика», 2009, г. Иркутск; «Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири», 2010, г. Хабаровск; «Кайнозойский континентальный рифтогенез», 2010, г. Иркутск; на семинарах лаборатории современной геодинамики ИЗК СО РАН.

По результатам исследований, проведенных в ходе выполнения работы, опубликовано 15 работ, в том числе 8 из них в рецензируемых журналах, рекомендованных перечнем ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из 5 глав, введения и заключения. Общий объем работы составляет 148 страницы, в том числе 39 рисунков, 5 таблиц, 2 приложения и список литературы из 148 наименований отечественных и зарубежных публикаций.

Благодарности.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность к.г.-м.н. Санькову В.А. за постоянную конструктивную помощь и участие в выполнении работы. Автор глубоко признателен к.г.-м.н. Мирошниченко А.И., Бызову Л.М., Санькову А.В. (ИЗК СО РАН) а также коллегам из ИГиП ДВО РАН г. Благовещенск чл.-корр. РАН д.г.-м.н. Сорокину А.П., к.т.н. Серову М.А. за организацию и проведенные полевые работы. Автор благодарит, проф., д.г.-м.н. Леви К. Г. за доброжелательную помощь, к.г.-м.н. Лухнева А. В. за конструктивные замечания, Рукосуева А.И. – за техническую помощь и советы

по работе с операционными системами семейства UNIX. Автор признателен Э. Кале (Purdue University, West Lafayette, USA) за консультации по статистическому анализу GPS данных, к.ф.-м.н. Дембелову М.Г. (БНЦ СО РАН) за предоставление данных GPS наблюдений в г. Улан-Удэ, а также всем сотрудникам лаборатории современной геодинамики ИЗК за поддержку и посильную помощь.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Идентификация литосферных плит и определение их кинематики

В начале данной главы дается обзор принципов выделения литосферных плит. Распределение эпицентров землетрясений зарекомендовало себя как основной метод локализации межплитных границ. Помимо сейсмологических данных, критериями для идентификации границ могут служить: геоморфологические признаки (срединно-океанические хребты, системы глубоководных желобов и островных дуг, горно-складчатые сооружения); геофизические данные (резкие изменения мощности литосферы); геологические данные (состав и формационные характеристики изверженных пород).

Во второй части главы приводится краткое описание методов определения параметров движения литосферных плит. Движение любого тела на сфере постоянного радиуса можно описать вращением вокруг оси, проходящей через центр сферы. Ось вращения пересекает поверхность сферы в двух диаметрально противоположных точках. Эти точки называются полюсами вращения или полюсами Эйлера. Зная параметры Эйлера полюса плиты, мы можем рассчитать значение линейной скорости в любой точке этого блока. В свою очередь, зная направление движения тела хотя бы в двух его точках, мы можем определить положение Эйлера полюса. Для этого достаточно найти точку пересечения больших кругов, направленных перпендикулярно направлению движения в этих точках.

Методы, используемые для определения параметров (скорости и направления) перемещения плит делят на относительные и абсолютные. Под относительным движением подразумевают движение плит относительно какой-либо другой плиты, выбранной как начало системы отсчета. Изучение характера движения относительными методами проводят на межплитных границах. Наиболее распространенным методом являются определение направления движения с помощью сейсмологических данных (по ориентировке напряжений в очагах землетрясений) и с помощью геолого-структурных данных (по простирацию разломов со сдвиговой кинематикой). Существует большое количество глобальных моделей кинематики плит, для которых применялись указанные методы [Morgan, 1968; Le Pichon, 1968; Minster et al., 1974; Minster, Jordan, 1978; Chase, 1978; Галушкин, Ушаков, 1979; DeMetz et al., 1994 и др.]. К методам, позволяющим определить абсолютное движение плит, относятся палеомагнитный, палеоклиматический методы, а также выявление абсолютных движений по следам «горячих точек». Кроме того, здесь приводится исторический обзор кинематических моделей литосферных плит, основанных на перечисленных классических методах.

В заключительной части главы отдельно выделяются модели движения плит, полученные методами космической геодезии, активно развивающиеся в последние десятилетия, [Drewes, Angermann, 2001; Sella et al., 2002; Kreemer et al., 2003; Prawirodirdjo, Bock, 2004]. Впервые, в глобальной модели движения литосферных плит по данным космической геодезии, Амурская плита была выделена в работе Кремера с соавторами [Kreemer et al., 2003]. В заключение добавим, что применение современных средств измерения движений на поверхности привело к выделению более мелких тектонических плит, и, что также важно, дало возможность идентификации тектонических единиц при их низких абсолютных скоростях.

Глава 2. Геологическое строение, границы и существующие модели кинематики Амурской литосферной плиты

Амурская плита имеет сложное геологическое строение и историю развития. Орогенные пояса, расположенные на современной территории Амурской плиты, формировались с позднего докембрия до мезозоя, а на периферии Палео-Тихого океана – в мезозое и кайнозое. Эти структуры обрамляют Северо-Азиатский и Сино-Корейский кратоны и северо-западную окраину Тихого океана. Северо-Азиатский кратон – жесткое ядро Северной Азии, которое увеличивалось в размерах за счет причленения молодых орогенных поясов. В составе фундамента выделяют гранит-зеленокаменные образования с возрастом 2600-3300 млн.лет. На его окраине выделяют также орогенные пояса с возрастом 1400-1100 млн. лет. Фундамент Сино-Корейского кратона также состоит из гранит-зеленокаменных образований возрастом 2500-2600 млн. лет. Древнейшие образования датируются в 3800 млн. лет [Парфенов и др., 2003]. Орогенные пояса, окаймляющие Северо-Азиатский кратон с юго-запада и юго-востока, при удалении от него омолаживаются, от позднепермских до позднепалеозойско-раннемезозойских. В мозаике орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии проявляются крупные линейные блоки, окруженные более молодыми орогенными поясами, нежели они сами. Среди таких блоков выделяются супертеррейны (Тувинно-Монгольский и Аргунский) – фрагменты познерифейских и раннепалеозойских орогенных поясов. По направлению к Тихому океану орогенные пояса также становятся более молодыми. Восточное окончание территории современной Амурской плиты, в понимании [Zonenshain, Savostin, 1981], замыкают Хокайдо-Сахалинский позднемеловой и Восточно-Сахалинский раннекайнозойский орогенные пояса.

В кайнозое, на территории Центральной и Восточной Азии, в литосфере начали формироваться новые структуры, нетипичные для более древних этапов тектонической жизни. Зоны, в которых происходят наиболее интенсивные процессы деструкции, маркируются повышенной сейсмической активностью. Л.П. Зоненшайн с соавторами (Зоненшайн и др., 1978, 1979; Zonenshain, Savostin, 1981), на фоне рассеянной картины распределения сейсмичности по территории Центральной Азии, выделили зоны концентрации эпицентров землетрясений, которые совпадают с «возрожденными горами» и, в целом, соответствуют межблоковым границам, из которых, как мозаика, составлена

Внутренняя Азия. Представленная авторами, модель блокового деления Центральной и Юго-Восточной Азии подразумевала выделение ряда новых тектонических единиц, одной из которых явилась Амурская малая плита. Положение границы Амурской плиты впоследствии не раз пересматривалось в работах других авторов. На сегодняшний день, среди исследователей нет единого мнения относительно положения ее границ. Обзор опубликованного материала, посвященного этой теме, позволяет выделить ряд литосферных блоков вдоль границ Амурской плиты: Становой и Забайкальский – на севере, Монгольский – на западе, Ордос – на юге, Японо-Корейский блок целиком, или блок Корейского п-ова отдельно – на востоке, чья принадлежность к Амурской плите спорна.

Введение новой тектонической единицы (Амурской плиты) в геодинамический анализ привлекло многих исследователей к вопросу о ее кинематике. В тексте диссертационной работы приведены опубликованные векторы вращения Амурской плиты относительно Евразийской. Все они, за исключением работы Ю.А. Зорина и Л. Корделла [Zorin and Cordell, 1991], основаны на анализе двух типов данных. Первый тип – это сейсмологические данные [Zonenshain, Savostin, 1981; Парфенов и др., 1987; Wei, Seno, 1998]. Остальные решения были получены по результатам GPS измерений.

Сравнение азимутов горизонтальных напряжений по сейсмологическим данным вдоль северной границы Амурской плиты с направлениями движений, рассчитанных по параметрам вращения плит, позволило разделить все решения вектора вращения Амурской плиты относительно Евразийской на две группы. В качестве восточной части границы Амурской и Евразийской плит принимался вариант, соответствующий работам [Геология и сейсмичность ..., 1984; Petit, Fournier, 2004; Шевченко, Каплун, 2007; Леви, 2008], а также совпадающий с южной границей выделяемого в статье [Парфенов и др., 1987] Станового блока и южной границей этого блока как буферной зоны В.С. Имаева с соавторами [2003]. В пользу такого выбора говорит хорошая орографическая выраженность границы хребтами Тукурингра и Джагды, линейный характер сейсмичности и четкое проявление разломов в рельефе.

Первая группа включает работы, где полюс вращения расположен таким образом, что предполагает обстановку растяжения на всем [Sella et al., 2002; Apel et al., 2006; Kreemer et al., 2003; Jin et al., 2007; Heki et al., 1999, Holt et al., 2000; England, Molnar, 2005; Wang et al., 2009] или практически на всем [Calais et al., 2006; DeMetz et al., 2010] протяжении северной границы Амурской плиты. Согласно решениям в приведенных работах, межплитная граница на восточном участке должна быть, в геоморфологическом плане, подобна БРС, а разрывные нарушения должны обязательно иметь сбросовую составляющую. Однако, по результатам геолого-структурных и морфотектонических исследований в Олекмо-Становой сеймотектонической зоне [Имаев и др., 2000, 2003], установлено присутствие разрывных нарушений надвигового, взбросового и сдвигового кинематических типов. Модель современного геодинамического состояния литосферы по геофизическим данным [Шевченко, Каплун, 2007] на границе Амурской и Евразийской плит также предполагает обстановку косо

сближения двух плит, что исключает возможность формирования структур, характерных для границ дивергентного типа.

Таким образом, лишь работы составляющие вторую группу решений [Zonenshain, Savostin, 1981; Парфенов и др., 1987; Wei, Seno, 1990; Hsu et al., 2006; Тимофеев и др., 2008; настоящая работа], в разной степени соответствия, позволяют описать смену СЗ-ЮВ близгоризонтального растяжения в БРС на СВ-ЮЗ сжатие в пределах восточного фланга границы Амурской и Евразийской плит.

Дискуссионность вопроса существования Амурской плиты, положения ее границ, а также многочисленные решения параметров движения Амурской плиты относительно Евразийской, во многом определили тему данной работы. Выбор GPS-геодезии в качестве метода для решения поставленной задачи определялся высокой точностью, относительной экспрессностью и экономичностью этой технологии.

Глава 3. GPS геодезия как метод исследования деформаций и кинематики движений плит

Система GPS состоит из трех секторов: космический, пользовательский и сектора управления и контроля. Космическая часть системы включает в себя созвездие GPS спутников, передающих радиосигналы L1 и L2 на частотах 1575.42 MHz и 1227.60 MHz, соответственно. На несущую частоту L1 модулируются кодовые сигналы – точный P-код (precision) и более низкочастотный C/A-код. На частоте L2 моделируются только сигналы P-кода. Определения расстояния между GPS спутниками и GPS антенной может осуществляться на основе двух типов измерений: 1) измерения на основе кодовых сигналов; 2) фазовые наблюдения.

Измерения на основе кодовых сигналов базируются на разнице в показаниях часов спутника (в момент передачи сигнала) и приемника (в момент получения сигнала). Высокоточные геодезические измерения с помощью GPS используют фазу биений несущих колебаний (carrier beat phase) – разницу между фазой несущей волны сигнала, полученной от спутника, и фазой, сгенерированной приемником.

Координаты наблюдателя могут быть вычислены по измерениям расстояний от группы спутников, используя метод пространственной засечки. То есть, определяется место пересечения сфер от четырех и более спутников. Центром сферы являются спутники, а ее радиусом – расстояние между спутником и антенной.

Существующие источники погрешностей условно делятся на ошибки, источником которых является спутник, ошибки, связанные с приемником, и ошибки, вызванные средой распространения сигнала.

К ошибкам, связанным со спутниковой группировкой, относят неточность знания эфемерид спутника (орбитальные ошибки), неточность хода бортовых часов.

К погрешностям, связанным с сектором потребителя, относят неточность хода часов приемника, Вариации фазового центра антенны, в зависимости от угла и азимута прихода сигнала, также являются источником погрешности.

К ошибкам условий среды распространения сигнала относят влияние ионосферы и тропосферы.

На основе геодезических измерений на коротких базовых линиях (0-100 км) в зонах разломов, можно определить поле деформаций земной коры, реологию мантии, и механизмы разломообразования. Этот масштаб длин также подходит для мониторинга верхнекоровых деформаций, связанных с поднятиями или опусканиями над мелкими магматическими камерами [Dixon, 1991]. Измерения, проводимые на длинных базовых линиях (100-1000 км), используются в основном для определения скоростей и азимута движений крупных блоков земной коры и литосферных плит. Точность измерений методами VLBI и SLR на длинных базовых линиях выше, нежели GPS измерений, но GPS выгодно отличается экономичностью и компактностью по сравнению с большими, громоздкими VLBI и SLR системами.

Глава 4. Результаты исследований современных движений на Амуро-Зейском геодинамическом полигоне

С 2001 по 2007 гг. было проведено пять серий измерений на шести пунктах полигона. В целом, полигон располагается во внутренней области Амурской плиты. Широтный профиль из пунктов наблюдений пересекает Нижне-Зейскую впадину и восточным своим окончанием выходит на Баджало-Буреинское поднятие. С востока профиль дополняется двумя постоянными пунктами КНАИ (Хабаровск) и YSSK (Южно-Сахалинск), входящих в состав IGS (Международная служба GPS). Результаты измерений, по мере накопления материала публиковались в работах [Саньков и др., 2004б; Ашурков и др., 2006; Ашурков и др., 2007; Ашурков и др., 2008; Мирошниченко и др., 2008; Быков и др., 2009].

При измерениях на Амуро-Зейском геодинамическом GPS-полигоне, нами использовался метод статического относительного позиционирования. Методика проведения GPS измерений и обработка полученных данных производилась с учетом факторов влияющих на конечную точность результата (см. гл. 3), и подробно изложена в тексте диссертации. Для обработки данных наблюдения использовался программный пакет GAMIT/GLOBK версии 10.35 [Herring et al., 2006a]. На первом этапе обработки GPS данных, используя дифференциальные фазовые наблюдения, мы рассчитали координаты пунктов, тропосферную задержку с интервалом два часа, параметры движения спутников, а также фазовые неоднозначности. Для решения использовались финальные орбиты спутников, предоставляемые Международной GPS-службой (IGS), параметры ориентации вращения Земли (IERS), таблицы зависимостей фазовых центров антенн от угла прихода спутникового сигнала, а также другие таблицы, рекомендованные IGS для расчетов. Для связи нашей сети с Международной системой отсчета ITRF2005 было использовано 28 IGS станций. На втором этапе мы объединили полученные ежедневные решения с результатами Scripps Orbital and Position Analysis Center (SOPAC,

<http://sopac.ucsd.edu/>) для глобальных станций, используя фильтр Кальмана (GLOBK) [Herring et al., 2006b]. На заключительном этапе, для уравнивания нашего решения с системой отчета ITRF2005 [Altamimi, 2007], были рассчитаны параметры трансформации для позиций станций и их скоростей.

По результатам измерений получено поле скоростей современных горизонтальных движений земной коры региона (рис. 1). Максимальная скорость субширотного укорочения установлена между станциями YSSK и КНАЖ, она составляет -6.4 мм/год. Выявлено резкое ослабление деформаций в направлении восток–запад, западнее пункт КНАЖ (г. Хабаровск). В то же время, здесь (на участке между пунктами SUTA-КНАЖ) установлено максимальное меридиональное смещение -1.87 ± 0.21 мм/год, что свидетельствует в пользу модели восточной границы Амурской плиты, проходящей именно по этой зоне (см. гл. 2).

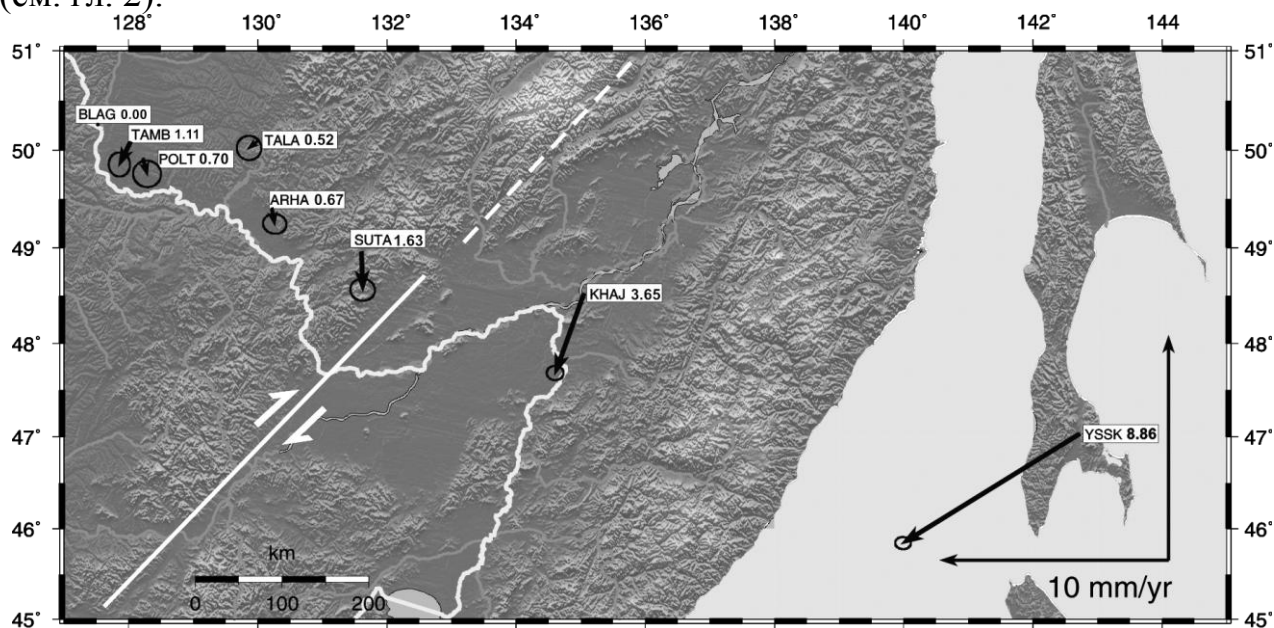


Рис. 1. Векторы горизонтальных скоростей смещений относительно пункта BLAG и их ошибки.

Глава 5. Параметры относительного движения Евразийской и Амурской плит и деформации на их границе

На основе данных расчета горизонтальных скоростей смещений, представленных в предыдущей главе, вычислены параметры полюсов вращения для Евразийской и Амурской плит. Учитывая неоднозначность проведения восточной границы Амурской плиты, рассчитаны два варианта полюса ее вращения относительно Евразии (таб. 2). В первом случае, для Амурской плиты использовались данные Амуро-Зейского геодинимического полигона, а также дополнительные данные измерений на станциях в городах Улан-Удэ и Улан-Батор, характеризующие движение плиты в ее западной части. Во втором случае, использовались те же станции, а также, замыкающий на востоке наш субширотный профиль, постоянный пункт КНАЖ (Хабаровск), входящий в состав сети IGS.

Для определения параметров вращения Евразийской (EU) литосферной плиты были использованы 11 станций из используемых в работах [Calais et al., 2003; 2006]. Критериями отбора пунктов являлись, совпадение измерений во

времени с нашими собственными наблюдениями, и величина остаточных скоростей после вычитания модели ITRF05-EU.

Резкое изменение меридиональной составляющей горизонтальных скоростей между пунктами SUTA и КНАЖ (см. гл. 4), значительное смещение полюса (таб. 2), при введении дополнительной точки (КНАЖ), а также результаты работ [Гатинский, Рунквист, 2004; Имаев и др., 2000, 2003; Малышев и др., 2007], дали основание предположить, что восточная граница плиты проходит между этими двумя пунктами по зоне разломов Тан-Лу.

Для проверки этой гипотезы был проведен статистический F-тест [Stein, Gordon, 1984] на принадлежность пункта КНАЖ к Амурской плите.

В результате установлено, что значение F составляет 9.65, что больше значения f для 99.9% уровня доверия, равного 6.7 (таб. 1). Таким образом, можно утверждать, что станция КНАЖ не принадлежит Амурской плите, и, следовательно, ее восточная граница пролегает на участке между пунктами SUTA и КНАЖ.

Таблица 1.
Параметры вращения для двух моделей Амурской плиты относительно Евразии.

GPS пункты	Кол-во плит	φ	λ	ω	N	χ^2	dof	F
BLAG, TAMB, POLT, TALA, ARHA, SUTA, ULAZ, ULAB	1	58.950± 0.52	122.285± 0.73	0.095± 0.003	16	144.4	13	
Теже + КНАЖ	1	62.362± 0.81	129.249± 1.34	0.064± 0.003	18	358.8	15	9.65

Примечание. λ – широта и ее ошибка, φ – долгота и ее ошибка, ω – угловая скорость вращения блоков и ее ошибка в град/млн. лет, N – количество данных χ^2 – сумма квадратов взвешенных остаточных скоростей, dof – степень свободы, F – значение для F-теста.

Как уже отмечалось, сам вопрос о существовании Амурской плиты является дискуссионным. Для того, чтобы проверить предположение о существовании Амурской плиты, мы также обратились к помощи F-теста.

На основании предыдущих результатов F-теста, мы не включили станцию КНАЖ в состав станций, определяющих движение Амурской плиты. Из таблицы 2 видим, что полученное значение для F-теста равно 22.5, что значительно

Таблица 2.
Параметры вращения для двух моделей движения Евразии.

Плита	Кол-во плит	φ	λ	ω	N	χ^2	dof	F
Евразия+ Амурская плита	1	55.851± 0.253	-97.076± 0.233	0.254± 0.001	38	855.1	35	
Евразия Амурская плита	2	54.193± 0.276	97.474± 0.243	0.246± 0.001	22	260.9	19	22.5
		68.494± 0.453	113.942 ±0.968	0.302± 0.002	16	144.4	13	

Обозначения те же, что и в таблице 1.

выше критического значения 4.46 при 99.9% уровне доверия. Это говорит о том, что гипотеза о возможном описании всех данных единым движением неоправданна, и можно утверждать, что выделение Амурской плиты в качестве отдельной тектонической единицы правомерно.

Полученное в данной работе, положение полюса вращения Амурской плиты в Евразийской системе отсчета мы рассмотрели более подробно. Как и в главе 2, мы сравнили теоретические направления движения на межплитной границе с напряжениями, слип-векторами, а также с сейсмотектоническими деформациями (СТД) и голоценовыми скоростями смещений по разломам БРС.

Из рисунков 2 и 3, мы видим, что теоретические векторы смещений показывают сходство с направлениями минимальных сжимающих напряжений и осей удлинения сейсмотектонических деформаций (СТД) БРС. Также отмечается очень близкая ориентировка азимутов конвергенции, но уже с осью максимального горизонтального сжатия и осей укорочения для Тукурингро-Джагдинской сейсмической ветви.

Используя полученные параметры вращения Амурской плиты, мы рассчитали линейные скорости раскрытия БРС и скорости конвергенции на Тукурингро-Джагдинском участке межплитной границы. В районе южной оконечности оз. Байкал скорость составляет 2.3 мм/год, в центральной части – 1.75 мм/год, на севере Байкальской впадины скорость дивергенции составляет 1.25 мм/год. Далее на северо-восток, в связи с изменением простираения межплитной границы и уменьшением углового расстояния до полюса вращения, мы наблюдаем быстрое падение линейной скорости. Значения скоростей уменьшаются от 1.3 мм/год в Кичерской впадине, 1.1 мм/год – в Верхне-Ангарской, 0.8 мм/год – в Муйской, до 0.6 мм/год в Чарской впадине.

Изучение палеосейсмогенных деформаций юго-восточного сегмента Главного Саянского разлома позволило оценить скорость подвижки по данному разлому за голоцен [Саньков и др., 2009]. Для северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы, по результатам геолого-геоморфологических исследований разломов, были определены скорость и направление голоценовых горизонтальных смещений [Sankov et al., 2000]. Для того, чтобы получить скорость и направление голоценовых смещений вкостр простираения генеральной структуры в районах Баргузинской, Кичерской, Верхне-Ангарской, Муйской и Чарской впадин, вся территория северо-восточного фланга БРС была условно разбита на 5 районов. Блоки выбирались таким образом, чтобы они включали полученные векторы смещений по активным разломам [Sankov et al., 2000]. Сами блоки располагались ортогонально генеральному направлению межплитной границы. В рамках каждого такого блока рассчитывалась суммарная скорость, попавших в него векторов голоценовых смещений. Для этого вычислялся средний азимут смещения, на который проецировался каждый из векторов, путем умножения на косинус угла между средним азимутом и измеренным. После этого полученные значения суммировались. По крайним членам ряда отмечается увеличение скорости голоценовой дивергенции с северо-востока на юго-запад, что соответствует теоретическому ее распределению на основе параметров вращения плит. В целом, наблюдается превышение скоростей по геологическим данным над

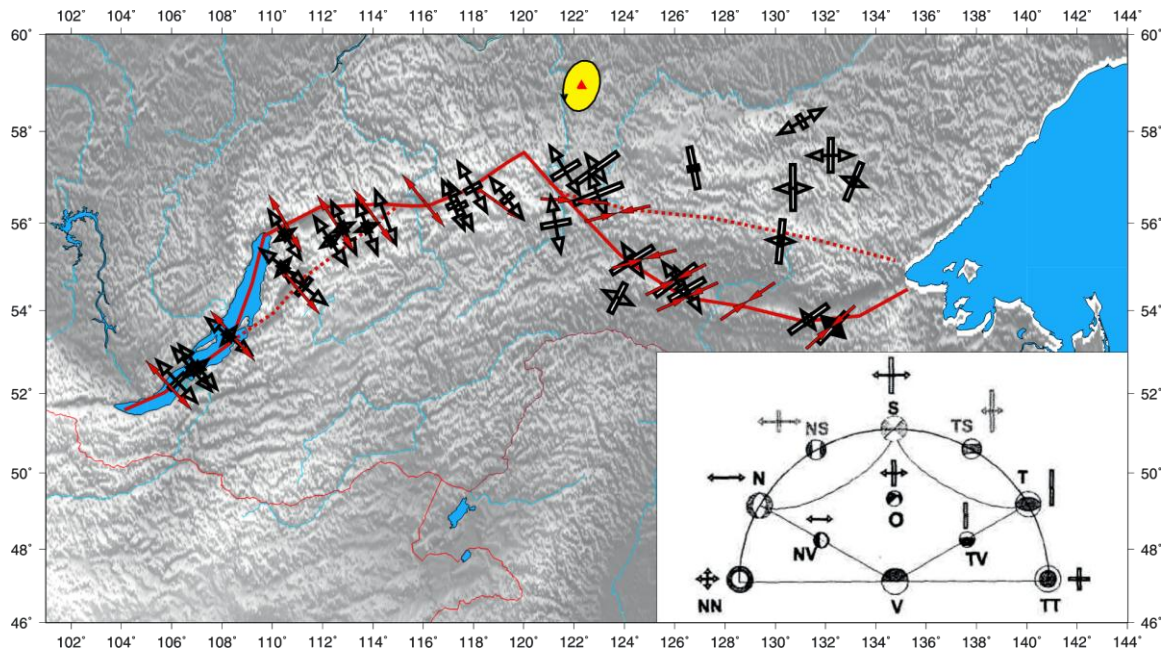


Рис. 2. Схема ориентаций осей горизонтальных сейсмотектонических деформаций Байкало-Становой сейсмической зоны [Новейшая тектоника ..., 2000 с изменениями]

Двойные линии показывают ориентацию горизонтального сжатия, отрезок с расходящимися стрелками указывает ориентацию горизонтального растяжения. На диаграммах механизмов очагов залитые области отвечают расположению оси растяжения. Заглавные буквы рядом с диаграммами обозначают режимы; при этом двойные буквы отвечают переходным режимам. Область VTSN в центральной части отвечает области допустимых значений для образов фокальных механизмов. Красными расходящимися и сходящимися стрелками обозначены векторы дивергенции и конвергенции, соответственно. Сплошная красная линия обозначает, принятую в настоящей работе, границу Амурской и Евразийской плит. Красной пунктирной линией показаны возможные варианты проведения межплитной границы.

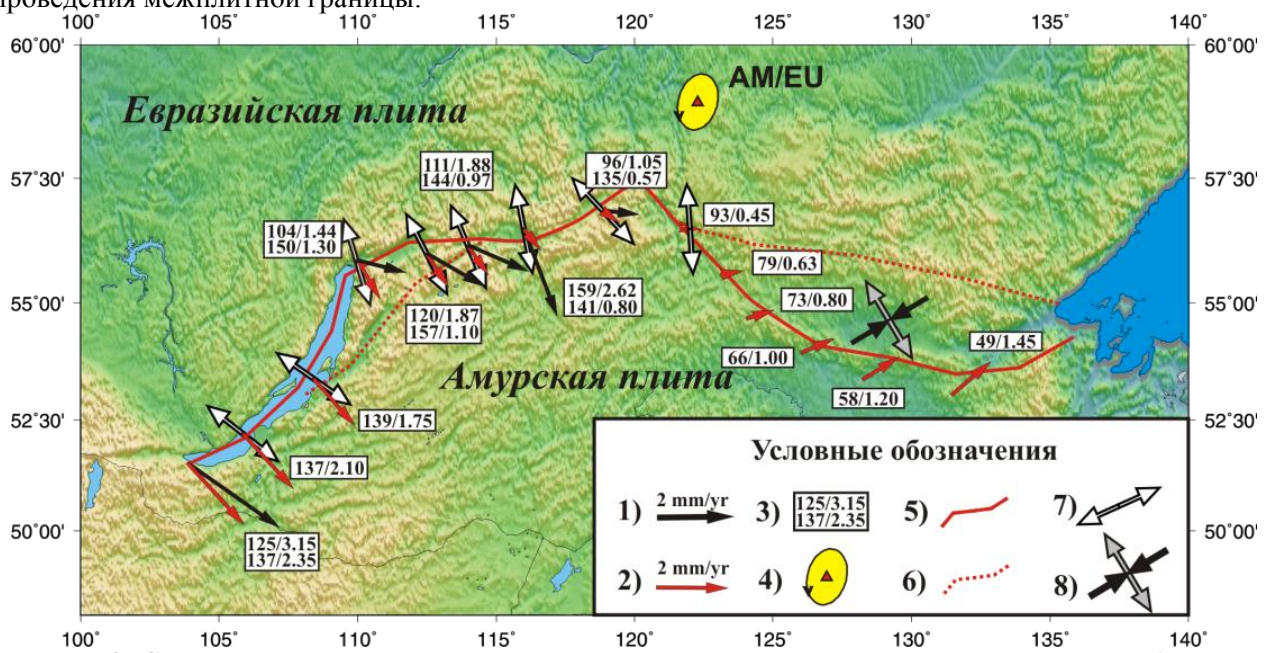


Рис. 3. Скорости дивергенции и конвергенции на межплитной границе Евразийской и Амурской плит.

1 – векторы дивергенции по геологическим данным [Sankov et al., 2000 с изменениями; Саньков и др., 2004a]; 2 – теоретические векторы движений по данным GPS измерений; 3 – азимут/скорость в мм/год (сверху – по геологическим данным, снизу – по данным GPS); 4 – полюс вращения Амурской плиты относительно Евразийской (эллипс – ошибка определения полюса, стрелка указывает на вращение против часовой стрелки); 5 – межплитная граница; 6 – возможные варианты межплитной границы; 7 – ориентация минимального горизонтального сжимающего напряжения S_h [Petit et al, 1996], 8 – ориентация горизонтального максимального (S_H – черные стрелки) и минимального (S_h – серые стрелки) сжимающего напряжения [Barth, Wenzel, 2010]

значениями по модели вращения Амурской плиты относительно Евразии (рис. 3). Это можно частично объяснить заниженным значением скорости раскрытия БРС, что связано с осреднением скоростей, полученных на пунктах GPS наблюдений при расчете скорости вращения плит. Склонение векторов голоценовых смещений к широтным азимутам, возможно, связано с вращениями блоков в пределах широкой зоны межплитной границы и неравномерностью развития деформаций по ее простиранию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным GPS измерений с 2001 по 2007 гг. на Амуро-Зейском геодинамическом полигоне было получено поле скоростей современных горизонтальных движений. Анализ полученных скоростей показал, что на участке между GPS станциями YSSK и КНАJ отмечается максимальная скорость субширотного укорочения составляющая -6.4 мм/год. Далее на запад от пункта КНАJ деформации резко затухают. Здесь же, между пунктами SUTA-КНАJ, фиксируется максимум относительного долготного смещения, которое составляет ≈ -1.9 мм/год. Этот район пространственно совпадает с зоной разломов Тан-Лу. Полученные данные соответствуют правосторонней кинематике этого разлома.

На основе поля скоростей внутриплитных территорий Амурской и Евразийской плит, рассчитаны их параметры вращения в системе отсчета ITRF2005. Учитывая неоднозначность проведения восточной границы Амурской плиты, были проведены статистические тесты для выявления станций, расположенных вне жесткого тела плиты. В результате, статистически было доказано, что пункт в г. Хабаровск (КНАJ) не принадлежит Амурской плите, и, следовательно, ее восточная граница пролегает на участке между пунктами SUTA и КНАJ. Подобный тест был проведен на предмет независимости Амурской плиты от Евразии. Результаты теста показали, что гипотеза о едином движении не оправдана. Полнос вращения Амурской плиты в Евразийской системе отсчета получен в точке с координатами $58.950^\circ \pm 0.519^\circ$ с.ш. и $122.285^\circ \pm 0.73^\circ$ в.д., скорость вращения составила $0.095^\circ/\text{млн.лет}$.

Рассчитанные, в соответствии с полученными параметрами вращения Амурской и Евразийской плит, векторы смещений для межплитной границы, показали хорошее совпадение с направлением осей растяжения механизмов очагов землетрясений БРС и осей удлинения сеймотектонических деформаций БРС. Такое же близкое сходство теоретические векторы смещений имеют с направлениями оси сжатия среднего механизма Тукурингро-Джагдинского сейсмического пояса и осей укорочения сеймотектонических деформаций этого пояса, который рассматривается как восточный сегмент границы Амурской и Евразийской плит. Таким образом, можно заключить, что GPS измерения во внутриплитных районах Амурской и Евразийской плит позволяют получить, приближенную к реальной, картину напряженно-деформированного состояния на их границах. Вместе с тем, отметим, что сопоставление ориентаций наших теоретических векторов смещения со слип-векторами не имеют столь очевидного сходства. Если для БРС направления

сопоставляемых векторов, в целом, совпадают, то для Тукурингро-Джагдинского сейсмического пояса выделение каких-либо генеральных направлений слип-векторов, без подробного сейсмогеологического анализа, не представляется возможным.

Сопоставление векторов голоценовых смещений по Главному Саянскому разлому, разломам северо-восточного фланга БРС, полученных по палеосейсмологическим данным и по результатам геолого-геоморфологических исследований с теоретическими векторами раскрытия БРС, показало: 1) Наблюдается незначительное расхождение ориентаций смещений, на 7° , для южной оконечности оз. Байкал и практически одинаковые значения скоростей дивергенции (с учетом поправки на осреднение скоростей при расчетах угловой скорости вращения плит); 2) Для разломов северо-восточного фланга характерен разворот векторов горизонтальных голоценовых смещений к широтному направлению, что придает кинематике разломов левостороннюю составляющую; 3) Особо выделяется Муйский сегмент рифтовых впадин, где значения горизонтальных скоростей превышают на два порядка значения скоростей по модели вращения плит и соседних секций. Этот эффект находится в тесной связи с таким же двукратным превосходством вертикальных скоростей. Чередование направлений смещений северо-восточного фланга БРС может свидетельствовать о взаимодействии отдельных блоков или их вращении в рамках межплитной границы. По всей видимости, ожидать совпадения направлений смещений по геологическим и геодезическим данным можно только в условиях сформировавшихся генеральных структур полностью контролирующей деформационный процесс на межплитных границах. Характерным примером такого поведения является центральная часть БРС.

Список публикаций по теме диссертации

1. Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Леви К.Г, **Ашурков С.В.**, Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г, Кале Э., Девершер Ж., Верноль М., Бехтур Б., Ш. Амарджагал. Современные движения земной коры Монголо-Сибирского региона по данным GPS-геодезии. // Доклады академии наук, 2003, том 392, № 6, с. 792-795.

2. Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Радзиминович Н.А., В.И., Мельникова, **Ашурков С.В.**, Кале Э., Девершер Ж. Количественная оценка современных деформаций земной коры Монгольского блока по данным геодезии и сейсмо тектоники // Доклады академии наук, 2005, том 403, № 5, с. 685-688.

3. Мирошниченко А.И., Сорокин А.П. , Саньков В.А., Лухнев А.В., **Ашурков С.В.**, Сорокина А.Т., Панфилов Н.И., Серов М.А., Шерман С.И. Космическая геодезия в задачах геодинамики: Современные движения в Зейско-Буреинском бассейне. // Тихоокеанская геология, 2008, том 27, №1, с. 71-79.

4. Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., **Ашурков С.В.**, Бызов Л.М., Кале Э., Девершер Ж., Дембелов М.Г. Растяжение в Байкальском рифте: Современная кинематика пассивного рифтогенеза. // Доклады академии наук, 2009, том 424, №5, с. 664-668.

5. Быков В.Г., Бормотов В.А., Коковкин А.А., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Герасименко М.Д., Шестаков Н. В., Коломиец А.Г., Сорокин А. П., Сорокина А.Т., Серов М.А., Селиверстов Н.И., Магуськин М.А., Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф., Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., **Ашурков С.В.**, Бызов Л.М., Дучков А.Д., Тимофеев В.Ю., Горнов П.Ю., Ардюков Д.Г. Начало формирования единой сети деформационных наблюдений ДВО РАН // Вестник ДВО РАН, 2009, № 4, с. 83-93.

6. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., **Ашурков С.В.**, Кале Э. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // Геология и геофизика, 2010, том 51, №7, с. 1006-1017.

7. **Ашурков С.В.**, Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В., Сорокин А.П., Серов М.А., Бызов Л.М. Кинематика Амурской плиты по данным GPS геодезии // Геология и геофизика, (в печати).

8. Саньков В.А., Лухнев А.В., Парфеевец А.В., Мирошниченко А.И., **Ашурков С.В.** Сопряженность деформаций земной коры и верхней мантии Монголо-Сибирской подвижной области // Доклады академии наук, 2011, том 436, № 3 (в печати).

9. Саньков В.А., Лухнев А.А., Мирошниченко А.И., **Ашурков С.В.**, Сорокин А.П., Сорокин А.А. Первые результаты измерений современных движений на Амуро-Зейском GPS-полигоне // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Иркутск: ИЗК СО РАН - ИрГТУ, 2004, с.170-173.

10. **Ашурков С.В.**, Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Саньков В.А. Современные движения на Амуро-Зейском геодинамическом полигоне. Тезисы докладов Третьей Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле, 27-29 ноября 2006 г., Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 2006, с. 22-23.

11. **Ашурков С.В.**, Мирошниченко А.И., Саньков В.А., Лухнев А.В., Сорокин А.П., Сорокина А.Т., Серов М.А. Современные движения на Амуро-Зейском геодинамическом полигоне. Тектоника и металлогения Северной Циркум – Пацифики и Восточной Азии: Материалы Всеросс. Конф. с международным участием, посвящ. памяти Л.М. Парфенова, Хабаровск, 11-16 июня 2007 г./ Под общей ред. А.И. Ханчука – Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2007, с. 26-28.

12. **Ашурков С.В.**, Мирошниченко А.И., Саньков В.А., Лухнев А.В., Сорокин А.П., Серов М.А., Бызов Л.М. Движения и деформации Амурской плиты по данным измерений методом GPS-геодезии // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы: Материалы 4 Междунар. Симпозиума, г. Бишкек, 15 – 20 июня 2008 г.: НС РАН, 2008, с. 129-134.

13. **Ашурков С.В.**, Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В., Сорокин А.П., Серов М.А., Бызов Л.М. Кинематика и границы Амурской плиты по данным GPS геодезии // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири: докл. науч. симпоз., 1-4 июня 2010, г. Хабаровск / под ред. В.Г. Быкова, А.Н. Диденко.– ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2010, с. 9-12.

14. **Ашурков С.В.**, Саньков В.А., Мирошниченко А.И. Мгновенные скорости дивергенции Евразийской и Амурской плит на байкальской межплитной границе // Кайнозойский континентальный рифтогенез: Материалы Всерос. симпозиума с международным участием, посвященного памяти Н.А. Логачева в связи с 80-летием со дня рождения / Под редакцией Е.В. Склярова, С.В. Рассказова. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010, Т. 1, с. 53-56.

15. **Ашурков С.В.**, Серов М.А., Бызов Л.М., Саньков А.А. К вопросу о восточной границе Амурской плиты // Современные проблемы геологии, геохимии и геоэкологии дальнего Востока России: Материалы 3-й региональной конференции молодых ученых, Владивосток: Дальнаука, 2010, с. 15-17.