



ЖИЖЕРИН Владимир Сергеевич

**СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ВЕРХНЕГО ПРИАМУРЬЯ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПО ДАННЫМ GPS НАБЛЮДЕНИЙ**

Специальность: 25.00.03 – Геотектоника и геодинамика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и природопользования Дальневосточного отделения Российской академии наук (ФГБУН ИГиП ДВО РАН, г. Благовещенск).

Научный руководитель:

Сорокин Андрей Анатольевич, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, директор ФГБУН Института геологии и природопользования ДВО РАН (ФГБУН ИГиП ДВО РАН, г. Благовещенск)

Официальные оппоненты:

Диденко Алексей Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник лаборатории тектоники ФГБУН Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН (ФГБУН ИТиГ ДВО РАН, г. Хабаровск)

Саньков Владимир Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией современной геодинамики ФГБУН Института земной коры СО РАН (ФГБУН ИЗК СО РАН, г. Иркутск)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ФГБУН ИМГиГ ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск)

Защита состоится «20» мая 2021 года в 09-00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.022.03 при Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУН ИЗК СО РАН и на сайте: <http://crust.ru/images/upload/newsfull188/2447.pdf>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета, кандидату физико-математических наук Добрыниной Анне Александровне по вышеуказанному адресу или e-mail: dobrynina@crust.irk.ru. Тел: 8(3952)427000.

Автореферат разослан «15» февраля 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 003.022.03, кандидат физико-математических наук



А.А. Добрынина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Изучению движений земной коры посвящено множество исследований как прикладного, так и фундаментального характера. Быстрые смещения земной поверхности в разломных зонах, особенно связанные с землетрясениями, могут приводить к катастрофическим последствиям. Медленные смещения необходимо учитывать при строительстве и эксплуатации протяженных объектов, таких как железные и автомобильные дороги, магистральные трубопроводы, плотины и др. Для Верхнего Приамурья исследование современных движений земной коры особенно актуально в связи со сложной тектонической обстановкой и высоким уровнем сейсмической активности, которые обусловлены транспрессионным механизмом взаимодействия Евразийской и Амурской литосферных плит. Актуальность работы обосновывается и тем, что подобные исследования на выделяемой территории ранее никогда не проводились.

Цель работы: Создание интегрированной геодинамической модели, отражающей современное блоковое строение и межблоковые взаимодействия в зоне сочленения Евразийской и Амурской плит в пределах Верхнего Приамурья.

Задачи исследования:

1. Создание на территории Верхнего Приамурья геодинамического полигона и проведение на нем периодических GPS измерений.
2. Вычисление поля современных горизонтальных скоростей движений на основании изменения пространственных координат положения пунктов геодинамического полигона.
3. Определение параметров блоковой делимости на основании геолого-геофизических данных.
4. Определение кинематики выделенных блоков на основе полученного поля скоростей.
5. Построение геодинамической модели блокового взаимодействия тектонических единиц.

Объектом исследования в данной работе является деформируемая поверхность земной коры в пределах Верхнего Приамурья. **Предметом** исследования при этом выступали современные горизонтальные смещения участков земной поверхности на изучаемой территории.

Методологическую основу и методы исследования можно разделить на две группы. К первой относятся методы космической геодезии, куда входят: проведение геодезических измерений на пунктах геодинамического полигона, камеральная обработка полученных в ходе измерений данных, вычисление поля горизонтальных скоростей в глобальной системе отсчета. Вторую группу составляют математические методы обработки и анализа полученного фактического материала: сглаживание и интерполирование поля скоростей, тензорное исчисление.

Фактический материал. В основе исследования лежат материалы, собранные автором за время работы в Институте геологии и природопользования ДВО РАН. В первую очередь, это материалы, полученные в ходе полевых работ с 2007 по 2018 гг. Полевые работы в 2007 году проводились совместно с сотрудниками ИЗК СО РАН, в дальнейшем полевые работы проводились сотрудниками лаборатории петрогенезиса и геодинамики. Наблюдения проводились на 20 реперных пунктах, 3 из которых работают в непрерывном режиме. Кроме того, были использованы данные GPS наблюдений постоянных станций международной геодинамической сети IGS.

Защищаемые положения:

1. На основе измерений методом GPS геодезии на Верхнеамурском геодинамическом полигоне показано, что область взаимодействия Амурской и Евразийской плит тектонически нестабильна и представляет собой транзитную зону, в пределах которой реализуются транспрессионные деформации, вызванные взаимодействием этих плит.
2. Наиболее интенсивные деформации земной коры (на 2 порядка выше типичных значений для внутриплитных участков) наблюдаются между Тукурингской системой разломов и Желтулакской шовной зоной, а также вблизи Становой системы разломов, в то время как Аргунский и Джугджуро-Становой блоки деформируются слабо.
3. Вычисленное поле дивергенции (дилатации) свидетельствует о том, что процессы растяжения земной коры наиболее активно проявляются в области смыкания Южно- и Северо-Тукурингских разломов на западном обрамлении Монголо-Охотского складчатого пояса и в восточном сегменте Желтулакской шовной зоны. Большая часть территории Джугджуро-Станового и Селенга-Станового блоков испытывает сжатие.

Научная новизна работы.

1. На основании количественных оценок поля современных горизонтальных скоростей вычислены скорости тектонических деформаций на северной границе Амурской плиты. Поле тектонических деформаций неоднородно, выявлены как области растяжения, так и области сжатия.

2. Предложен новый вариант строения и пространственного положения северной границы Амурской плиты.

Теоретическая и практическая значимость. Количественная оценка современных движений и деформаций земной коры необходима для безопасного ведения человеком хозяйственно-экономической деятельности в массивах горных пород и на земной поверхности, т.к. даже на весьма небольших участках имеют место деформационные процессы различного периода и амплитуды, которые представляют серьезную опасность для крупномасштабных инфраструктурных объектов, оказавшихся в зоне влияния подвижных тектонических структур. Наибольшему риску подвержены протяженные объекты, такие как магистральные нефтепроводы и газопроводы, мосты, плотины и т.п., которые в силу своего размера могут пересекать множество тектонических нарушений разных рангов.

В фундаментальном плане полученные в работе результаты позволят углубить научные представления о механизмах коллизионного взаимодействия литосферных плит, а также уточнить границы Евразийской и Амурской плит в пределах изучаемой территории.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Согласно паспорту научной специальности 25.00.03 работа соответствует пунктам № 3 и № 4.

Пункт № 3: «Изучение вертикальных и горизонтальных тектонических движений: как современных (инструментальными методами), так и древних (геологическими и палеомагнитными методами)», т.к. в работе инструментальными методами изучаются современные вертикальные и горизонтальные тектонические движения.

Пункт № 4: «Сейсмотектоника – изучение тектонических закономерностей проявления землетрясений в пространстве и во времени, составление карт сейсмического районирования», т.к. в исследовании сопоставляются вычисленные в работе значения скорости деформаций земной поверхности и проявления землетрясений в пространстве и во времени.

Личный вклад. Автор лично участвовал в проведении полевых работ по сбору многолетних данных периодических GPS наблюдений, осуществлял конвертацию и обработку полученных в ходе полевых работ данных. На основе которых автором лично, с использованием специализированных программных комплексов, были вычислены: временные ряды смещений и векторное поле горизонтальных скоростей смещений пунктов геодинимического полигона, а также значения первого и второго инварианта тензора скорости деформации.

Апробация результатов. Основные результаты представляемой работы докладывались и обсуждались на 11 конференциях, симпозиумах и совещаниях международного, всероссийского и регионального уровня, в том числе: «Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии» (г. Благовещенск, 2010), XI региональной научно-практической конференции «Молодежь XXI века: шаг в будущее» (г. Благовещенск, 2010), «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе» (г. Иркутск, 2012), VIII Всероссийской конференции «Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии: Косыгинские чтения» (г. Хабаровск, 2013), III Всероссийская научная конференция: «Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов восточной Азии» (г. Благовещенск, 2014), «Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз» VI Сахалинская молодежная. научная. школа (г. Южно-Сахалинск, 2016), XVI научное совещание «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)», (г. Иркутск, 2018), VII Всероссийская научная конференция «Современные проблемы регионального развития», (г. Биробиджан, 2018), V Всероссийская научная конференция с международным участием «Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов восточной Азии» (г. Благовещенск, 2018), XXVIII Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 2019), X Всероссийской конференции с международным участием «Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии: Косыгинские чтения» (г. Хабаровск, 2019).

Публикации. По теме диссертации опубликованы автором лично или в соавторстве 23 работы, в том числе 7 статей в российских рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России.

Достоверность результатов обеспечивается собранным автором обширным материалом полевых и камеральных работ, применением новейших версий программных продуктов, признанных в международном научном сообществе, а также значительным списком опубликованных работ по теме диссертации.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из 5 глав, введения, заключения и приложения. Общий объем работы составляет 120 страниц печатного текста, в том числе 24 рисунка, 2 таблицы, список использованной литературы включает 89 наименований.

Благодарности. Автор благодарен своему научному руководителю д.г.-м.н., А.А. Сорокину за всестороннюю помощь при проведении исследований и подготовке диссертационной работы, а также к.т.н. М.А. Серову за плодотворное сотрудничество.

Связь работы с научными проектами. Диссертационная работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 18-35-00049).

ГЛАВА 1. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, ГЕОДИНАМИКА И НЕОТЕКТОНИКА ВЕРХНЕАМУРСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

Верхнее Приамурье с точки зрения геологического строения, современной геодинамики и происходящих на данном этапе тектонических процессов представляет собой весьма интересную и малоизученную область. История ее развития связана с многократными сменами направленности геодинамических процессов, отражавшимися в формировании соответствующих обстановок, эволюция которых протекала под воздействием многофакторных механизмов, каждый из которых достоин отдельного тщательного изучения [Парфенов и др., 2003].

Изучаемый в работе регион находится в пределах тройного сочленения Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП), Сибирской платформы и Тихоокеанского складчатого пояса. На более детальном уровне он отражает взаимодействие тектонических единиц Аргунского континентального массива, Монголо-Охотского складчатого пояса (МОСП), Селенга-Станового и Джугджуро-Станового блоков.

Неоднократное проявление орогенно-магматических эпизодов в истории развития региона обусловило его складчато-глыбовое, блоковое строение с крупномасштабными ареалами развития гранитоидного магматизма. Обобщение сведений о новейшей тектонике, а также главных особенностях геолого-геофизического строения, основных разломах и сейсмичности исследуемой территории можно найти в работах предшественников [Ашурков и др., 2011; Ашурков и др., 2016; Горнов и др., 2009; Горошко и др., 2010; Диденко и др., 2010; Имаев и др., 2003; Имаева и др., 2012; Каплун, 2006; Леви, 2007; Малышев и др., 2007; Николаев, 1973; Николаев и др., 1978; Подгорный, Малышев 2005; Сахно, 2002; Семенов, 2002; Тимофеев и др., 2011; Ханчук и др., 2012; Шевченко, Каплун, 2007; Zhao, Liu, 2010; Zonenshain, Savostin, 1981].

Геодинамическая целостность Амурской мегаструктуры на современном этапе развития подтверждается данными GPS мониторинга [Ашурков и др., 2011; Ашурков и др., 2016], о чем также может свидетельствовать система отсчета ITRF2014, на которой отдельно выделяется Амурская плита [Altamimi et al., 2016].

ГЛАВА 2. GPS ГЕОДЕЗИЯ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ

На сегодняшний день основным методом для изучения смещений земной поверхности как на глобальном, так и на региональных и локальных уровнях является космическая геодезия. Ее основным инструментом по совокупности своих характеристик выступает GPS-геодезия. Именно бурное развитие последней позволило получить точные оценки скорости современных тектонических процессов на различных участках литосферных плит.

В первой части главы представлен исторический обзор измерений современных тектонических движений. Приводятся результаты изучения современных движений, полученные методами классической наземной геодезии, и краткая история появления космической геодезии, ее основные преимущества и недостатки.

Вторая часть посвящена общим сведениям о глобальной спутниковой навигационной системе GPS. Описываются основная идея спутникового позиционирования, состав и строение космической группировки GPS спутников, структура сигнала, передаваемая спутниками, разрешающая способность приемников спутникового сигнала, основные источники погрешностей при выполнении GPS наблюдений.

В третьей части главы приводится обзор зарегистрированных методами GPS геодезии скоростей смещений земной поверхности на различных геодинамических полигонах: Тибетское нагорье [Wang et al., 2009; Wang et al., 2008], Непал [Verma, Bansal, 2012], Тянь-Шань [Wang et al., 2007], Монгольский и Гобийский Алтай [Lukhnev et al., 2010], Киргизия [Levi et al., 2009], Камчатка [Levin et al., 2010], Индийская плита [Verma, Bansal, 2012], Филиппины [Chen et al., 2013], Аравийская плита [Nilforoushan et al., 2003], Байкальская рифтовая система [Саньков и др., 2009; Sankov, 2014], Восточно-Африканская рифтовая система [Nocquet et al., 2006], Сино-Корейская платформа [Jin et al., 2006], Сихотэ-Алинь [Тимофеев и др., 2008].

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СОВРЕМЕННЫХ ТЕКТНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ НА ВЕРХНЕАМУРСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

Для определения скорости современных тектонических движений были организованы режимные наблюдения. Они состояли в периодическом измерении положения пунктов геодинамического полигона.

3.1. Материалы и методы исследования

Геодинамический полигон на территории верхнего Приамурья простирается в субширотном направлении от точки ERO1 с координатами 121.96 в.д., 53.96 с.ш. до точки ZEY1 (127.25 °в.д., 53.75 °с.ш.) и в субдолготном – от точки MAGD (125.80 °в.д., 53.47 °с.ш.) до точки STAN (124.87 °в.д., 56.05 °с.ш.) (координаты даны в системе WGS-84). Измерения на реперных пунктах выполнялись 1 раз в год, для минимизации влияния сезонных отклонений на точность позиционирования все полевые кампании проводились в течение августа–сентября. В большинстве случаев продолжительность наблюдений на одной точке составляла не менее 36 часов. Измерения проводились приемниками Ashtech Z-Extreme, оснащенными антеннами с улучшенными показателями подавления помех типа choke ring. Запись информации приемниками осуществлялась с 30-ти секундным интервалом.

Данные измерений обрабатывались программным пакетом GAMIT/GLOBK, разработанным в Массачусетском Технологическом Институте.

Процедура обработки данных состоит из нескольких этапов. На первом этапе осуществляется дневная обработка данных полевых наблюдений с привлечением глобальных данных, включающих в себя: точные эфемериды спутников, параметры ориентации Земли EOP (Earth Orientation Parameters), предоставляемые международной службой вращения земли IERS (International Earth Rotating Service), таблицы нутации стандарта (IERS/IGS), лунные и солнечные эфемериды, таблицы отклонения системного времени GPS от всемирного координированного времени UTC (Coordinated Universal Time), смещения для кодовых измерений P1-C1 и P1-P2, таблицы гравитационных приливных эффектов, деформирующих земную кору с амплитудой, достигающей у полюсов 10 см [Permanent components of the crust, geoid and ocean]. Моделирование тропосферной задержки сигнала осуществлялось на 2-часовых интервалах. Минимальный угол восхождения спутника (угол отсечки) над горизонтом принимался равным 10 градусам. Также на этом этапе обработки использовались RINEX (Receiver Independent Exchange Format) файлы станций международной сети IGS (International GPS Service), полученные с ftp сервера cddis.gsfc.nasa.gov.

На следующем этапе посуточные данные (вычисленные координаты пунктов) группировались с помощью программы GLOBK в объединенные h-файлы, каждый из которых содержит ковариационную матрицу и откорректированные значения априорных параметров.

На заключительном этапе объединялись обработанные данные полевых измерений за несколько лет для получения окончательного решения в виде скоростей смещений пунктов. Для вычисления скоростей была использована система отсчета на основе данных о положении и скоростях не менее 20 IGS станций, принадлежащих различным участкам взаимодействующих плит. Реализация системы отсчета осуществлялась через «обобщенные ограничения» (параметры Гельмерта).

3.2. Результаты исследований

В результате обработки полевых данных получены временные ряды, характеризующие изменение во времени координат пунктов геодезических наблюдений, также было получено векторное поле скорости смещений пунктов геодинамического полигона Верхнего Приамурья (рис. 1). Стрелками показаны направления векторов, а их величины соответствуют значению скорости смещения, эллипсы на концах стрелок показывают доверительный интервал с вероятностью 95%.

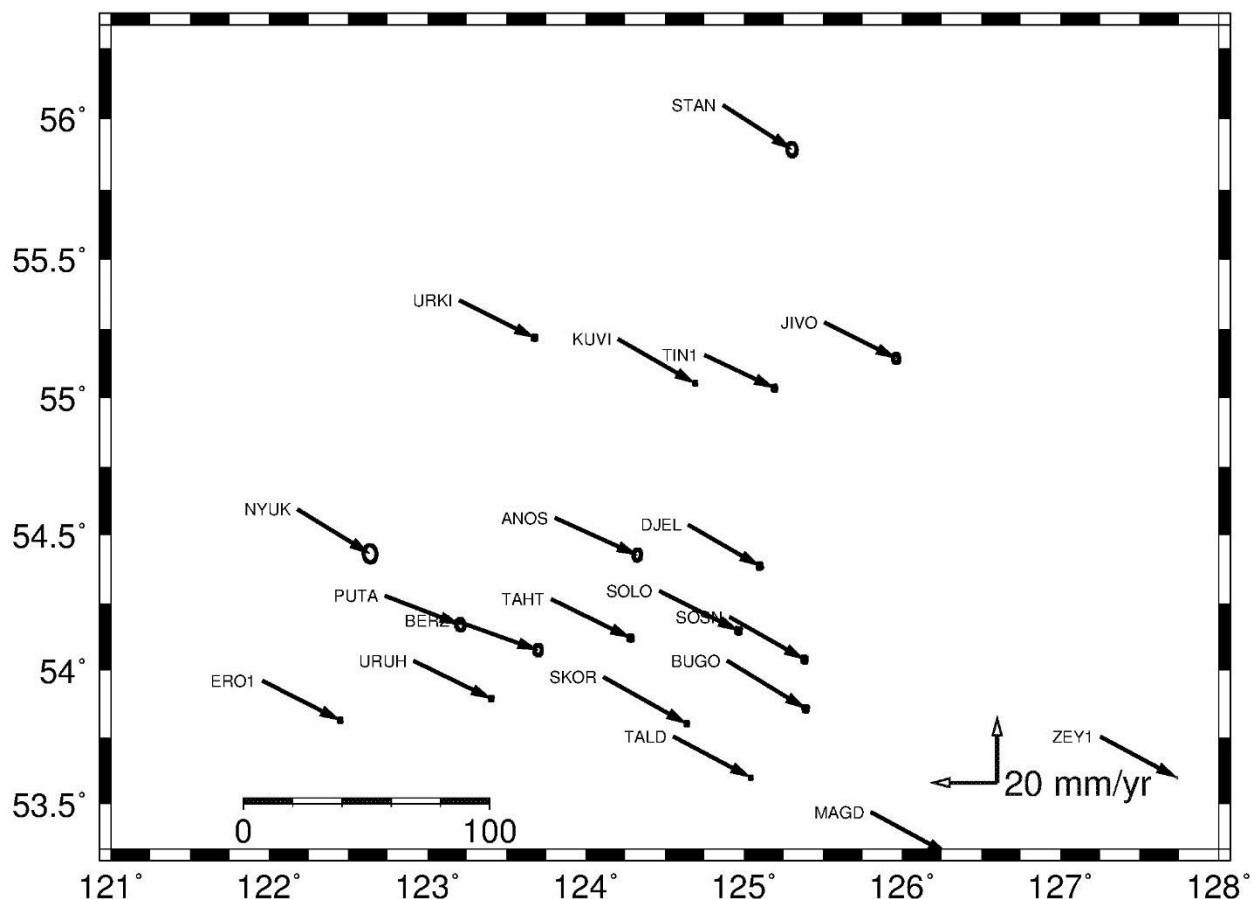


Рисунок 1. Векторное поле скорости смещений пунктов геодинамического полигона Верхнего Приамурья в системе координат ITRF2014.

ГЛАВА 4. КИНЕМАТИКА ОСНОВНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР ВЕРХНЕГО ПРИАМУРЬЯ

Первая часть главы посвящена общей кинематике исследуемого полигона как единой структуры. В целом относительно общеземной системы отсчета исследуемый регион смещается на ЮВВ со скоростями 24–30 мм/год и представляет в первом приближении единую структуру. Однако разница в скоростях между близкорасположенными точками указывает на довольно высокую современную активность перемещений тектонических блоков между Тукурингской и Желтулакской разломными системами (рис. 2).

Желтулакская шовная зона разделяет территории с различными полями тектонических напряжений. Для Селенга-Станового блока доминирующие сжимающие напряжения действуют в субширотном направлении, восточнее Желтулакской шовной зоны на территории Джугджуро-Становом блока они направлены на северо-восток [Имаев и др., 2003].

Сложное мозаично-гетерогенное строение и повышенный уровень сейсмической активности исследуемого региона, пространственно коррелирующий с максимальными величинами отклонения векторов по азимуту и величине, говорит о том, что неотектонический этап на территории Верхнего Приамурья контролируется взаимодействием разломно-блоковых структур различного размера, генезиса и ранга. Подтверждением этому также является разнообразие механизмов очагов землетрясений, произошедших на исследуемой территории [Имаев и др., 2005].

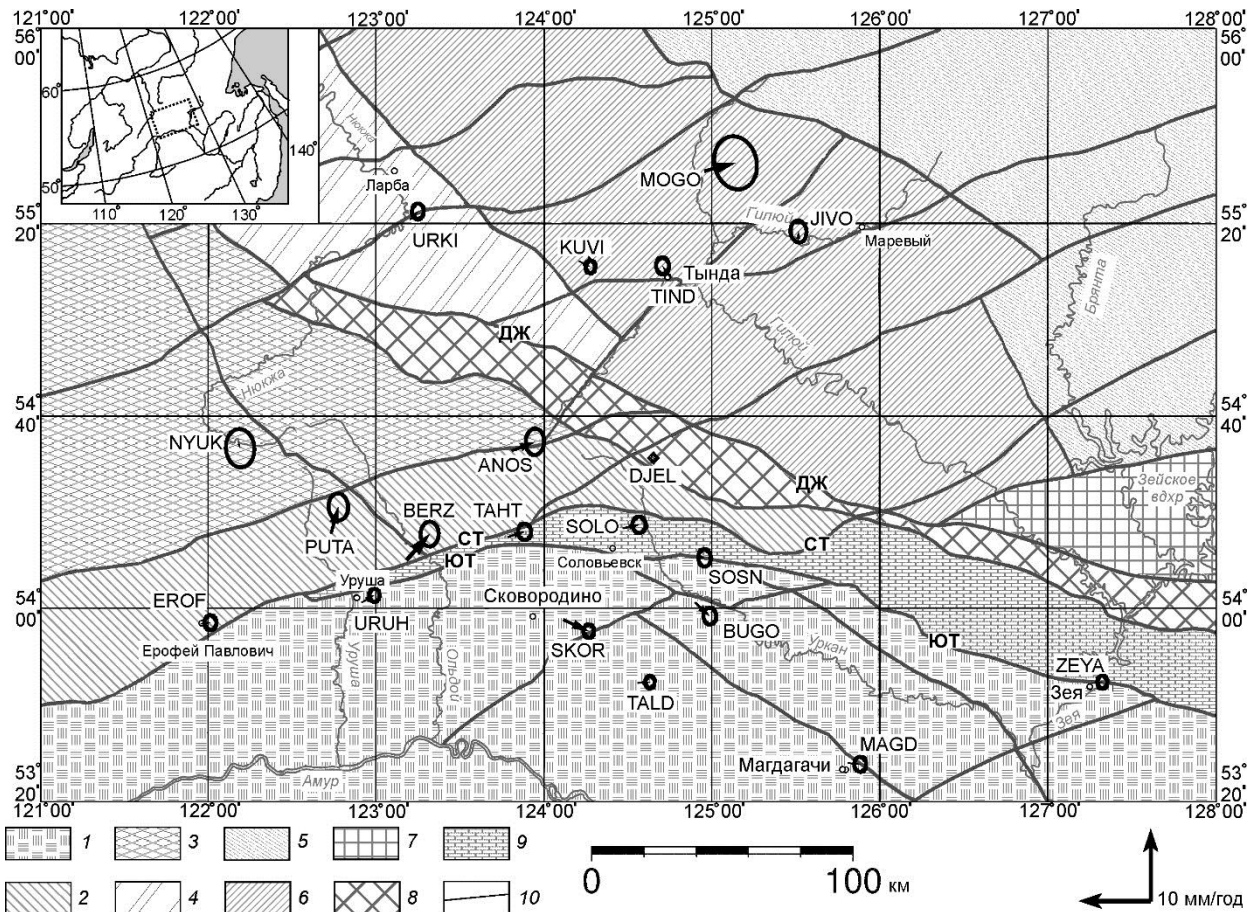


Рисунок 2. Схема блокового строения Верхнего Приамурья (составлена по материалам: [Государственная геологическая карта..., 2009; Глубинное строение и..., 2010; Геодинамика, магматизм и металлогения..., 2006]). Главные тектонические структуры Верхнего Приамурья: 1 – Аргунский блок; 2-3 – структуры Селенга-Станового блока, подблоки: 2 – Урканский, 3 – Могочинский; 4-7 – Структуры Джугджуро-Станового блока, подблоки: 4 – Ларбинский, 5 – Брянтинский, 6 – Иликанский, 7 – Дамбукинский; 8-9 шовные зоны: 8 – Джелтулакская шовная зона, 9 – Монголо-Охотский складчатый пояс; 10 – разломы различного ранга, из них наиболее активные: ЮТ – Южно-Тукурингрский, СТ – Северо-Тукурингрский, ДЖ – Джелтулакский. Вектора скорости смещений пунктов (стрелки) приведены относительно пункта DJEL с эллипсами 95 % доверительного интервала.

Вторая часть главы посвящена кинематике основных блоковых структур.

Монголо-Охотский блок. Вычисленные вектора смещений точек наблюдения в пределах Монголо-Охотского блока значительно отличаются друг от друга как по направлению, так и по амплитуде, тем самым указывая на сложную картину происходящих здесь деформаций. На западном фланге Монголо-Охотского блока развиваются наибольшие по амплитуде деформации растяжения земной коры, в то время как для центральной области и восточного фланга скорости деформаций растяжения значительно меньше.

Характер тектонического режима в пределах Монголо-Охотского складчатого пояса позволяет соотнести его с участком буферной или транзитной зоны, в пределах которой реализуются тектонические напряжения, возникающие в силу различия кинематики окружающих его тектонических единиц. Подробное описание структуры транзитных зон и их роли в геодинамике континентальной литосферы приводится в работе [Гатинский и др., 2008].

Джугджуро-Становой блок. Характер установленного поля смещений в пределах Джугджуро-Станового блока говорит о его тектонической целостности на современном этапе, несмотря на то, что он расположен в зоне влияния комплекса тектонических факторов: раскрытие восточного крыла Байкальской рифтовой системы в области транспрессионного взаимодействия Евразийской и Амурской плит.

Наличие на локальных участках масштабных деформационных процессов и ряд особенностей его геолого-геофизического строения (в частности, материалы МТЗ, гравитационных и магнитных съемок) позволяют сделать вывод, что для некоторых небольших участков площади блока более характерна разломно-блоковая тектоника с сопутствующим развитием «зон концентрированной деформации» [Леонов, 2012].

Аргунский блок. Несмотря на сложное гетерогенное геологическое строение Аргунского блока, что отражается в структуре геофизических полей, в его пределах установлена однородность векторного поля скоростей смещений, что говорит о его кинематической целостности и тектонической жесткости.

Анализ временных рядов пунктов GPS наблюдений показывает, что в настоящее время происходит общее поднятие полигона. Причем скорости восходящих движений не везде одинаковы, наибольшие скорости (до 4 мм/год) отмечаются на точках, расположенных в районах положительных морфоструктур Монголо-Охотского складчатого пояса и Желтулакской шовной зоны. В пределах Джугджуро-Станового блока скорости вертикальных движений близки к нулю. Для Селенга-Станового блока оценить вертикальные смещения не представляется возможным в силу незначительного периода наблюдений. Аргунский блок испытывает поднятие со средней скоростью порядка 2 мм/год.

ГЛАВА 5. ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ СОВРЕМЕННЫХ ТЕКТНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

5.1. Современные деформации Верхнего Приамурья

Математическое описание происходящих на земной поверхности смещений обычно представляется в векторной форме в виде двумерного поля скоростей. Такое описание не является инвариантным, т.к. при смене начала системы отсчета величина и направление векторов изменяются. Но реально существующие связи между определяющими процессы величинами не зависят от выбранного способа описания. Переход от векторного способа описания величин к скалярному позволяет получить инвариантные численные значения (одинаковые во всех системах отсчета) для изучаемых процессов [Лурье, 1970]. Для такого перехода воспользуемся тензорным исчислением. В механике (деформируемого) твёрдого тела в области упругих и упругопластических деформаций незначительной величины обычно используется тензор малых деформаций Коши (1):

$$T_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \frac{1}{2}\gamma_{zx} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{zy} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xz} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}; \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (3)$$

где $u(x,y,z)$, $v(x,y,z)$, $w(x,y,z)$ – проекции вектора перемещения по осям координат x , y , z .

Тензор деформации имеет три инварианта:

$$I_{1\varepsilon} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \quad (4)$$

$$I_{2\varepsilon} = \varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y \varepsilon_z + \varepsilon_z \varepsilon_x - \frac{1}{4}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) = \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_3 \varepsilon_1, \quad (5)$$

$$I_{3\varepsilon} = |\varepsilon_{ij}| = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3. \quad (6)$$

На большинстве участков земной поверхности величина горизонтальных компонент вектора перемещений на порядок превосходит вертикальную компоненту, следовательно, последней можно пренебречь. Таким образом, для двумерной системы первый инвариант тензора деформаций – дивергенция, может быть найдена как:

$$\text{Div}V = \frac{\partial V_e}{\partial e} + \frac{\partial V_n}{\partial n}, \quad (7)$$

где e – долгота, n – широта.

Величина, получаемая из уравнения (7), характеризует скорость изменения размера площади и дает значения среднегодовых приращений площади в некоторой точке. Физический смысл этой величины заключается в обнаружении «источников» ($\text{div} > 0$) и «стоков» ($\text{div} < 0$) векторного поля. Применительно к задачам геодинамики дивергенция позволяет обнаруживать участки, на которых площадь земной поверхности увеличивается или уменьшается, т.е. области общего растяжения или сжатия.

Величины $\varepsilon_e = \frac{\partial V_e}{\partial e}$ и $\varepsilon_n = \frac{\partial V_n}{\partial n}$ являются среднегодовыми приращениями деформаций по широте и долготе соответственно и представляют собой компоненты тензора скоростей деформаций. Переход к этим величинам выполнен через интерполяцию векторов скоростей на равномерную сетку с размером ячейки в $1/3$ градуса, далее для каждого узла сетки была вычислена дивергенция (рис. 3).

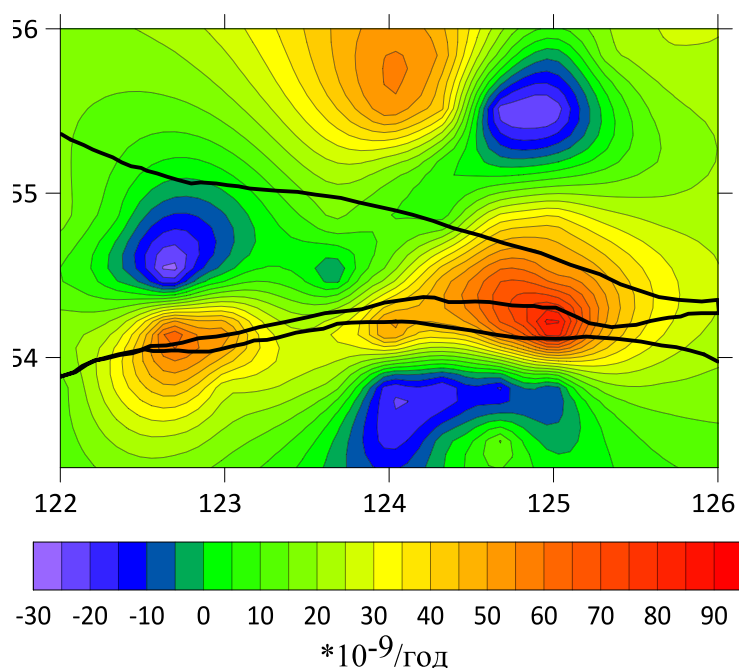


Рисунок 3. Первый инвариант тензора скорости деформации – дивергенция (скорость дилатации).

Вычисленное поле дивергенции обнаруживает, что процессы растяжения земной коры наиболее активно проявляются в области Z-образного сочленения Джелтулакской и Тукурингрской систем разломов. Менее активные области растяжения расположены в зоне смыкания Южно- и Северо-Тукурингрских разломов на западном обрамлении Монголо-Охотского складчатого пояса и на северо-западе Иликанского блока. Области общего сжатия охвачены центральные части территорий Иликанского, Могочинского и Аргунского блоков.

Второй инвариант тензора скорости деформации – это численное выражение общей скорости деформации, который включает в себя как деформации изменения площади, так и деформации сдвига. Компоненты тензора скорости деформации имеют вид:

$$\varepsilon_e = \frac{\partial V_e}{\partial e}, \quad \varepsilon_n = \frac{\partial V_n}{\partial n}, \quad \varepsilon_{en} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_e}{\partial n} + \frac{\partial V_n}{\partial e} \right). \quad (8)$$

В условиях плоской деформации главные значения тензора Альманси определяются через компоненты соотношениями:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_e + \varepsilon_n \pm \sqrt{(\varepsilon_e - \varepsilon_n)^2 + 4\varepsilon_{en}^2} \right). \quad (9)$$

Тогда второй инвариант тензора скоростей деформаций (рис. 4) может быть вычислен по формуле:

$$I_2 = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}. \quad (10)$$

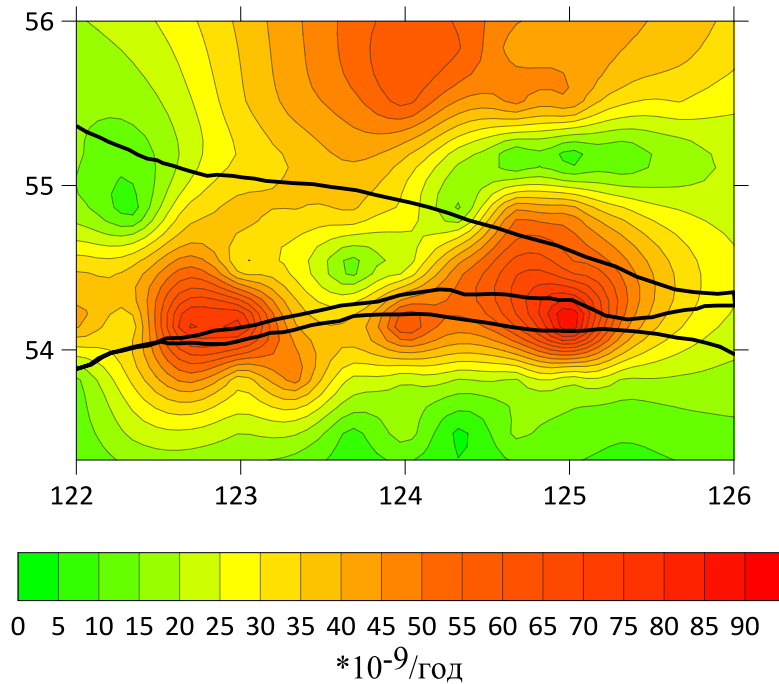


Рисунок 4. Второй инвариант тензора скорости деформации.

Как известно, в зонах крупных сейсмоактивных разломов происходит основная релаксация напряжений, возникающих при взаимодействии тектонических блоков [Гатинский и др., 2008; Хаин, Ломизе, 2005 и др.]. Такими разломами на исследуемой территории являются Джелтулакский, Северо- и Южно-Тукурингрский. Если допустить, что в пределах разломной зоны релаксируются все напряжения взаимодействия разделяемых ею блоков, то вычисленные значения деформаций для точек, расположенных по разные стороны разлома, необходимо интерполировать отдельно.

Схемы (рис. 5, 6), отображают вычисленные значения первого и второго инвариантов тензора скорости деформации с учетом полной релаксации напряжений в разломной зоне. Предложенный подход позволяет детализировать распределение деформаций вблизи основных разломных зон. Вычисленные с его использованием значения скорости деформаций позволяют более четко выделить район максимально интенсивных деформаций в области Z-образного сочленения Тукурингрской и Джелтулакской разломных зон на фоне окружающих его структур.

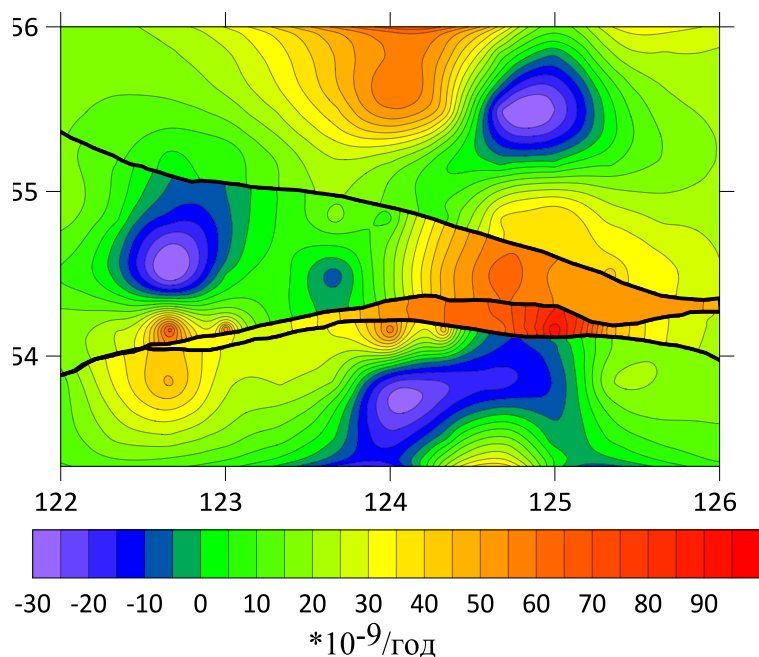


Рисунок 5. Первый инвариант тензора скорости деформации – дивергенция (скорость дилатации), с учетом полной релаксации напряжений в разломной зоне

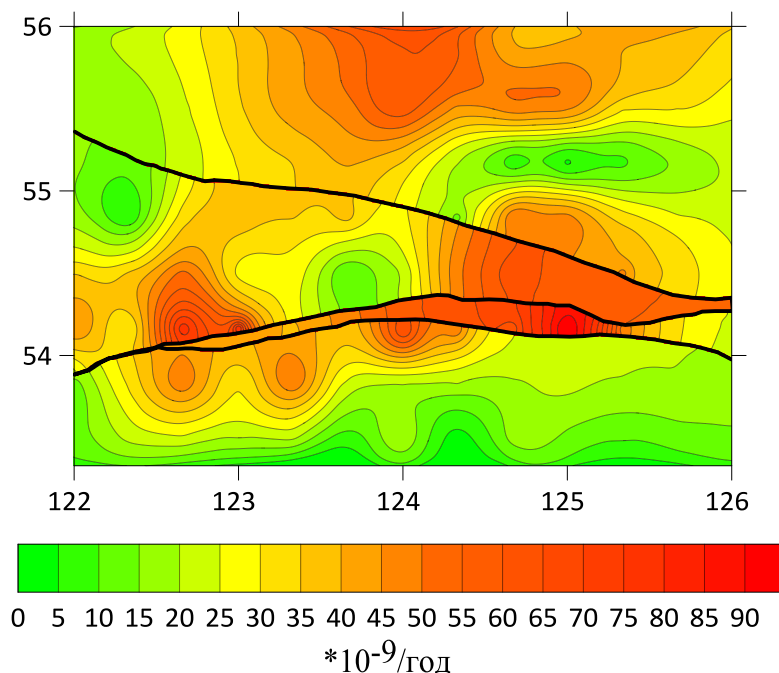


Рисунок 6. Второй инвариант тензора скорости деформации с учетом полной релаксации напряжений в разломной зоне

5.2 Геодинамическая интерпретация полученных результатов

На некоторых временных рядах пунктов геодинамического полигона отмечаются значительные отклонения пространственного положения пунктов от трендовых. Возможно, это связано с нелинейным характером происходящих тектонических подвижек, что весьма характерно для поведения разломно-блоковых структур на участках с высокой эндогенной активностью, или с обнаруженными совсем недавно медленными деформационными волнами в литосфере, скорости распространения которых на несколько порядков меньше скорости звука.

На данном этапе исследования современных тектонических движений на Верхнеамурском полигоне четко выявить северную границу Амурской микроплиты по геодезическим данным не представляется возможным. Возможно, она проходит по Становому разлому либо представляет собой довольно обширный участок, в пределах которого происходит плавное изменение векторов скорости точек, принадлежащих Евразийской плите, к векторам, характеризующим Амурскую микроплиту.

5.2.1 Соотношение современных деформаций земной коры и сейсмичности Верхнего Приамурья

Современные движения земной коры, вычисляемые методами космической геодезии, отображают характер геодинамических процессов лишь приповерхностной зоны. Полноценное описание геодинамических процессов, происходящих на разных глубинных горизонтах, возможно лишь на основании всего комплекса накопленных геолого-геофизических данных, в которых наиболее информативными являются данные о пространственно-временном распределении выделяемой сейсмической энергии.

Совместный анализ распределения вычисленных значений первого инварианта тензора скорости деформации и данных сейсмического мониторинга (рис. 7), позволил выявить, что в областях общего растяжения земной поверхности наблюдаются рассеянные по площади эпицентры землетрясений, в то время как в областях сжатия сейсмические события практически не регистрируются.

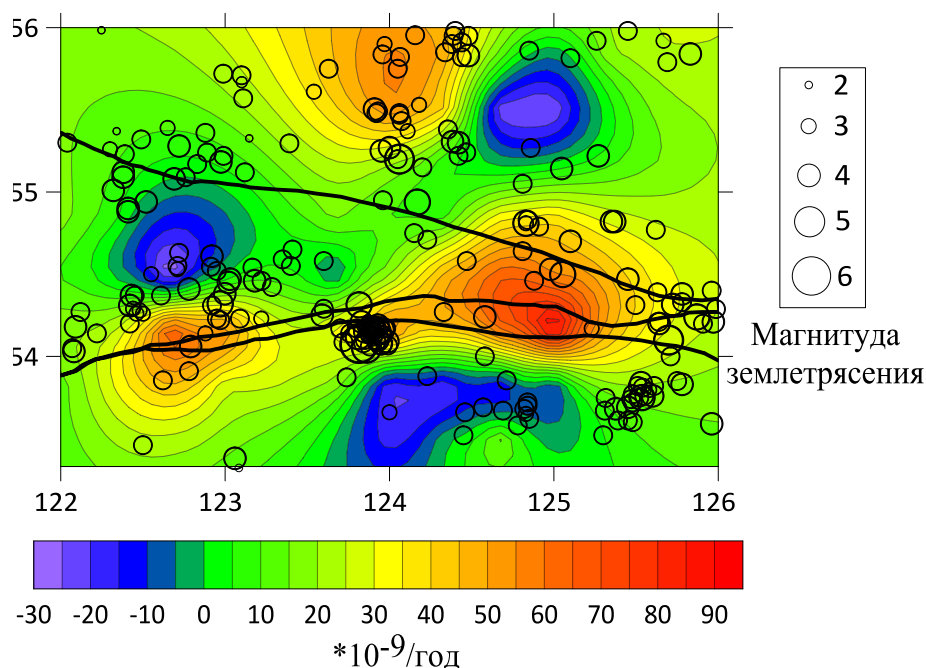


Рисунок 7. Первый инвариант тензора скорости деформации и эпицентральное поле землетрясений по данным IRIS [Incorporated Research Institutions... (электронный ресурс), 2018].

5.2.2 Соотношение современных деформаций земной коры и глубинного строения земной коры по данным МТЗ

Локальные аномалии значений средней плотности земной коры и электрического сопротивления могут свидетельствовать о наличии зоны пониженной механической прочности, в которой в первую очередь будут реализовываться прикладываемые тектонические напряжения.

Монголо-Охотский пояс, для которого установлена максимальная магнитуда деформационных процессов, в геоэлектрических полях выделяется наличием множества электропроводящих слоев.

Для Аргунского блока, в пределах которого интенсивность деформационных процессов значительно ниже, в геоэлектрических полях отчетливо выражаются два слоя. Верхний соотносится с земной корой и имеет мощность 30–40 км с типичным сопротивлением 1800–3700 Ом·м. Нижний слой мощностью 30–60 км и сопротивлением 100–500 Ом·м соотносится с литосферной мантией.

Обнаруженные в ходе настоящего исследования области развития интенсивных деформаций характеризуются по данным МТЗ наличием множества электропроводящих слоев, что, возможно, говорит о наличии тектонической расчлененности литосферы и разноуровневом характере перемещения блоков.

5.2.3 Северная граница Амурской плиты как зона современных тектонических деформаций земной коры

Для исследуемого региона одним из актуальных вопросов геодинамики является местоположение северной границы Амурской микроплиты, впервые выделенной в 1978 г. Л.П. Зоненшайном с коллегами на основании распределения эпицентров землетрясений [Зоненшайн и др., 1978].

Проведенные нами на территории Верхнего Приамурья исследования движений земной коры методами космической геодезии позволили получить векторное поле скоростей, характеризующее кинематику блоков в зоне предполагаемого сочленения Евразийской и Амурской плит. Однако на данном этапе исследования четко определить по кинематическим параметрам северную границу Амурской микроплиты не удалось. Скорее всего, она представляет собой довольно обширный участок, заключенный между Становым и Южно-Тукурингским разломами, в пределах которого происходит некогерентное изменение векторов скоростей точек, принадлежащих Евразийской плите, к векторам, характеризующим Амурскую микроплиту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное состояние наук о Земле обуславливает необходимость привлечения в качестве отправных данных при построениях результатов, полученных с помощью точных математических методов, выполненных на основе строгих методологических подходов. Эти данные должны удовлетворять критериям однозначности, обоснованности, верифицируемости и формальной непротиворечивости. Таким критериям в случае изучения происходящих на земной поверхности смещений, как это было показано в работе, полностью удовлетворяют методы космической геодезии.

Верхнее Приамурье – это уникальный по своей структуре и истории геологического развития регион, который давно привлекал внимание исследователей, однако зачастую их взгляды противоречили друг другу в силу неоднозначности их представлений и используемого материала. Результаты исследований, приведенные в настоящей работе, представляют собой первые количественные данные, характеризующие геодинамические процессы в приповерхностном слое земной коры на выделяемом участке. Они послужат фундаментальной основой для дальнейшего понимания геодинамики описанного региона и сопряженных с ним территорий.

Основные выводы, представленные в работе:

1. В целом относительно общеземной системы отсчета исследуемый регион смещается на ЮВВ со скоростями 24–30 мм/год и представляет в первом приближении единую структуру. Однако разница в скоростях между близкорасположенными точками указывает на довольно высокую современную активность перемещений тектонических блоков между Тукурингской и Желталукской разломными системами.

2. В настоящее время происходит общее поднятие полигона, причем скорости восходящих движений не везде одинаковы, наибольшие скорости (до 4 мм/год) отмечаются на точках, расположенных в районах положительных морфоструктур Монголо-Охотского складчатого пояса и Желтулакской шовной зоны.

3. Процессы растяжения земной коры наиболее активно проявляются в области Z-образного сочленения Желтулакской и Тукурингской систем разломов. Менее активные области растяжения расположены в зоне смыкания Южно- и Северо-Тукурингских разломов на западном обрамлении Монголо-Охотского складчатого пояса и на северо-западе Иликанского блока. Области общего сжатия охвачены центральные части территорий Иликанского, Могочинского и Аргунского блоков.

4. В областях общего растяжения земной поверхности наблюдаются рассеянные по площади эпицентры землетрясений, в то время как в областях сжатия сейсмические события практически не регистрируются.

5. Обнаруженные в ходе настоящего исследования области развития интенсивных деформаций характеризуются по данным МТЗ наличием множества электропроводящих слоев, что, возможно, говорит о наличии тектонической расслоенности литосферы и разноуровневом характере перемещения блоков.

6. На данном этапе четко определить по кинематическим параметрам северную границу Амурской микроплиты не представляется возможным. Скорее всего, она представляет собой довольно обширный участок, заключенный между Становым и Южно-Тукурингским разломами, в пределах которого происходит некогерентное изменение векторов скоростей точек, принадлежащих Евразийской плите, к векторам, характеризующим Амурскую микроплиту.

Весомая значимость полученных результатов, кроме их роли в развитии фундаментальных представлений, заключается и в практической оценке возможных рисков возникновения сильных землетрясений. К сожалению, на данный момент достоверно предсказать время возникновения, место и магнитуду землетрясения мы не можем, однако в наших силах выявить участки, на которых величина деформационных процессов достигает предельных значений, способных формировать условия для осуществления разрядки тектонических напряжений в форме сейсмических событий с возможными катастрофическими последствиями. Это особенно актуально для Верхнего Приамурья, т.к. на его площади расположены важные инфраструктурные объекты: сотни километров действующих магистральных нефтепроводов, строящиеся пути газопроводов, Зейская гидроэлектростанция, Байкало-Амурская железнодорожная магистраль, а также множество населенных пунктов, в которых проживает более 100 тыс. человек.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, включенных в «Перечень...» ВАК Минобрнауки России

1. **Жижерин В.С.**, Серов М.А. Кинематика современных тектонических движений в пределах восточной части Монголо-Охотского складчатого пояса // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 12. С. 2143–2152.
2. **Жижерин В.С.**, Серов М.А. Современная тектоника западной части Джугджуростанового террейна юго-восточного обрамления Северо-Азиатского кратона // Геотектоника. 2017. № 6. С. 1–6.
3. Серов М.А., **Жижерин В.С.** Моделирование напряженно-деформированного состояния земной коры Верхнего Приамурья // Успехи современного естествознания. 2017. № 10. С. 107–112.
4. Серов М.А., **Жижерин В.С.** Современная кинематика северной части Аргунского континентального массива (восточная часть Центрально-Азиатского складчатого пояса) // Успехи современного естествознания. 2017. № 8. С. 111–116.
5. **Жижерин В.С.**, Серов М.А., Сорокин А.П. Современная кинематика северной окраины Аргунского континентального массива // Доклады Академии Наук. 2018. Т. 479. №1. С.41–43.
6. Ашурков С.В., Серов М.А., **Жижерин В.С.**, Имаев В.С. Современные деформации на территории Верхнего Приамурья по данным GPS измерений // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37. № 5. С. 86–96.
7. **Жижерин В.С.**, Серов М.А., Холобуда С.П. Моделирование геодинамических процессов Верхнего Приамурья на основе GPS данных // Успехи современного естествознания. 2018. № 11. С. 103–108.

Материалы и тезисы докладов научных конференций

1. Серов М.А., **Жижерин В.С.** Современные движения земной коры на территории Северо-Восточной окраины Центрально-Азиатского складчатого пояса // Современные проблемы регионального развития: материалы IV международной научной конференции. Биробиджан, 09-12 октября 2012 г. / Под ред. Е.Я. Фрисмана. Биробиджан: ИКАРП ДВО РАН – ФГБОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-Алейхема», 2012. 321 с. ISBN 978-5-904121-04-4, 978-5-8170-0197-6.
2. Серов М.А., **Жижерин В.С.** Современные движения земной коры Верхнего Приамурья // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 23-29 сентября 2012 г.). – В 2-х т. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. Т. 1. 217 с. ISBN 978-5-902754-71-8.
3. Сорокин А.П., Серов М.А., **Жижерин В.С.** Современные движения блоковых структур восточной окраины Центрально-Азиатского складчатого пояса // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии: Вторая Всерос. Науч. Конф.: сб. докладов. – Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2012. – 292 с. ISBN 978-5-903015-59-7
4. **Жижерин В.С.**, Серов М.А. Исследование современных движений земной коры на северной окраине Амурской микроплиты // Современные научные исследования на Дальнем Востоке: материалы молодежного научного симпозиума. – Южно-Сахалинск: Изд-во ИРОСО, 2012. – 352 с. ISBN 978-5-9050-78-49-1.
5. Серов М.А., **Жижерин В.С.** Современные деформации земной коры Верхнего Приамурья. // Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии: VIII Косыгинские чтения: материалы Всероссийской конференции, 17-20 сентября 2013, г. Хабаровск / отв. ред. А.Н. Диденко, Ю.Ф. Манилов. - Владивосток: Дальнаука, 2013. – 600 с. ISBN 978-5-8044-1380-5.
6. **Жижерин В.С.**, Серов М.А. Кинематика блоковых структур северной окраины Амурской микроплиты и ее отражение в сейсмичности. // Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию Геологического института СО РАН. Улан-Удэ, ИД «Экос», 2013 г. – 448 с. ISBN 978-5-905013-17-1.
7. Серов М.А. **Жижерин В.С.** Современные деформации блоковых структур восточной окраины Центрально-Азиатского складчатого пояса // Материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых «Трофимукские чтения-2013», ИНГиГ СО РАН. 2013. С. 214–217.

8. **Жижерин В.С.**, Серов М.А. Кинематика Верхнего Приамурья по данным космической геодезии // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: Тезисы докладов Всероссийского совещания с участием приглашенных исследователей из других стран (11–16 августа 2014 г., г. Иркутск). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2014, С. 18.
9. Серов М.А., **Жижерин В.С.** Моделирование напряженно-деформированного состояния земной коры Верхнего Приамурья // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии: Третья Всероссийская конференция: сборники докладов в 2-х томах. - Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2014, Т. 1, С. 32–34.
10. Серов М. А., **Жижерин В. С.** Современные движения и моделирование напряженно-деформированного состояния земной коры северо-восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса // Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского, 16–20 февраля 2015 г., Санкт-Петербург, ФГУП «ВСЕГЕИ». – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2015. С. 46–49.
11. **Жижерин В.С.**, Серов М.А., Горнов П.Ю. Кинематика современных тектонических движений южной части Дальнего Востока России // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз : VI Сахалин. молодеж. науч. школа, Южно-Сахалинск, 3-8 октября 2016 г.: сб. мат. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2016, С. 101–104.
12. Серов М.А., **Жижерин В.С.** Развитие геодезической и сейсмической сети наблюдений на территории Верхнего Приамурья // XVI научное совещание «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)», ИЗК СО РАН, Иркутск, 16–19 октября 2018 г., С.242–243.
13. **Жижерин В.С.**, Серов М.А. Характер деформирования блоковых структур Верхнего Приамурья // XVI научное совещание «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)», ИЗК СО РАН, Иркутск, 16–19 октября 2018 г., С.104–105.
14. **Жижерин В.С.**, Серов М.А. Современные геодинамические наблюдения на территории Верхнего Приамурья // Пятая Всероссийская научная конференция с международным участием «Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов восточной Азии», ИГиП ДВО РАН, Благовещенск, 02–04 октября 2018 г., Т.1. С.16–19.
15. **Жижерин В.С.**, Серов М.А. Развитие геодинамической сети наблюдений на территории Верхнего Приамурья // VII Всероссийская научная конференция «Современные проблемы регионального развития», ИКАРП ДВО РАН, Биробиджан, 9–11 октября 2018 г., С. 49–51.
16. **Жижерин В.С.**, Серов М.А. Современная тектоника области сочленения Евразийской и Амурской плит // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVIII Всероссийской молодежной конференции (г. Иркутск, 8–14 апреля 2019 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2019. С. 68–69.