

УДК 551.2:550.8

## ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РУДОНОСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР (НА ПРИМЕРЕ РАЙОНА СТРЕЛЬЦОВСКОГО УРАНОВОРУДНОГО ПОЛЯ)

© 2017 г. В. А. Петров<sup>а, \*</sup>, А. Б. Лексин<sup>а</sup>, В. В. Погорелов<sup>б</sup>, Ю. Л. Ребецкий<sup>б</sup>, В. А. Саньков<sup>с</sup>, С. В. Ашурков<sup>с</sup>, И. Ю. Рассказов<sup>д</sup>

<sup>а</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН  
119017, Москва, Ж-17, Старомонетный пер., 35

<sup>б</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, Б. Грузинская ул., 10, стр. 1

<sup>с</sup>Институт земной коры Сибирского отделения РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128

<sup>д</sup>Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, 680000, Хабаровск, ул. Тургенева, 51

\*E-mail: vlad243@igem.ru

Поступила в редакцию 22.08.2016 г.

В статье представлены материалы по разработке трехмерной интегрированной модели напряженно-деформированного состояния массивов пород в районе Стрельцовского урановорудного поля (СРП) в Юго-Восточном Забайкалье на основе данных о современных напряжениях (использованы методы геоструктурного и тектонофизического анализа) и сейсмотектонических деформациях поверхности (использованы методы анализа механизмов очагов землетрясений и GPS-геодезии) с выделением активных разломов. Сочетание результатов геоструктурных, геофизических, геотектонических и петрофизических исследований, а также впервые разработанных схем разломной тектоники, распространения сейсмодислокаций и распределения сейсмотектонических режимов (стресс-тензоров) позволило сформировать модели строения, свойств и реологических связей геологической среды, определить граничные условия для числового тектонофизического моделирования методом конечных элементов. Расчетные 2D- и 3D-модели напряженно-деформированного состояния массивов пород интегрированы в трехмерную ГИС, созданную на платформе ArcGis 10 с модулем ArcGIS 3D-Analyst. Результаты моделирования подтверждены наблюдениями *in situ* на региональном (активная с середины плиоцена до наших дней Кличкинская сейсмодислокация) и локальном (неоднородно напряженный массив горных пород урановорудного месторождения Антей) масштабных уровнях. Разработка и внедрение региональной геодинамической модели геологических структур позволяют проводить мероприятия по обеспечению безопасности горных работ в сложных геомеханических и удароопасных условиях на действующих и строящихся рудниках ПАО «ППГХО» на единой методической и геоинформационной платформе, а также использовать результаты моделирования для оценки флангов и глубоких горизонтов рудного поля на предмет выявления новых рудных скоплений.

DOI: 10.7868/S0016777017030042

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработка и внедрение моделей долгосрочного прогнозирования состояния геологической среды, оценки риска возникновения и последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера является одним из ключевых условий обеспечения устойчивого развития секторов экономики, в которых функционируют объекты повышенной экологической опасности. Основные из них: шахтные поля горнорудных предприятий, перерабатывающие комплексы, радиохимические предприятия, пункты изоляции ядерных материалов различного уровня радиоактивности, плотины, газо- и нефтепроводы и т.д.

Сложность создания долгосрочных моделей обусловлена обширностью рассматриваемой тематики и междисциплинарностью решаемых задач. Долгосрочное прогнозирование базируется на целом ряде дисциплин из области наук о Земле, каждая из которых имеет свой предмет исследований, методические подходы к его изучению, способы получения, интерпретации и представления данных и т.д. Немаловажным фактором является разномасштабность (разноранговость) изучаемых природных и техногенных процессов, для понимания которых необходимо интегрировать разобщенные данные, имеющие как пространственную (глобальный, региональный и локальный масштабные уровни), так и времен-

ную (кратко-, средне- и долгосрочный прогноз) характеристики.

Тем не менее, к настоящему времени в целом сформирована научно-методическая база и накоплен большой опыт создания и применения моделей долгосрочного прогнозирования состояния геологической среды с учетом протекающих в ней геодинамических процессов и сейсмических явлений. Ключевую роль в этом играют геодинамические полигоны (Комплексные..., 1984). Они представляют собой специальным образом выбранные территории (участки массивов горных пород), в пределах которых проводится комплекс регулярных астрономо-геодезических, спутниковых, сейсмических, геофизических, геологических и целый ряд других наблюдений (на пунктах закрепленной сети), нацеленных на отслеживание деформационных процессов в верхней части земной коры.

На территории СССР было заложено и функционировало 60 геодинамических полигонов, из которых 34 были ориентированы на решение задач по прогнозу землетрясений и определению скорости вертикальных движений земной коры, 12 располагались в районах гидроэлектростанций с высокими плотинами, а еще 16 в районах интенсивной добычи нефти и газа. В настоящее время в районах интенсивной техногенной деятельности осуществляются или планируются мероприятия по созданию новых геодинамических полигонов. К таким районам относятся участки недр, где ведутся крупномасштабные горные работы или эксплуатируются ответственные подземные сооружения (подобные Северо-Муйскому тоннелю, Сахалинскому нефтепроводу, трубопроводной системе "Восточная Сибирь—Тихий океан" и др.).

В зависимости от целевого назначения полигона измерения на нем проводятся с разными интервалами времени: дни, первые месяцы, первые годы. Густота измерительной сети и применяемые методы изучения также определяются решаемыми задачами. Главное условие, которое обязательно выполняется при проектировании сети наблюдений, — выход крайних ее точек в фоновые области, по отношению к которым определяются аномальные параметры изучаемого объекта. Пункты наблюдений располагаются, как правило, на расстоянии от 10 до 100 км один от другого.

На геодинамических полигонах определяют современные горизонтальные и вертикальные перемещения разномасштабных (разноранговых) структурных элементов земной коры и их параметры (направление, абсолютная величина, скорость, фокальные механизмы землетрясений и т.п.) для реконструкции современного поля напряжений. С этой целью применяется комплекс методов, основными из которых являются: геодезические измерения, GPS-контроль, сейсмоло-

гические и сейсмодеформационные наблюдения, реконструкция неотектонических напряжений с помощью морфокинематического анализа разрывной тектоники, численное моделирование геомеханических процессов и т.д. Используются современные приборы, в частности лазерные деформометры, обеспечивающие высокоточные измерения деформаций земной коры и регистрацию крупномасштабных сейсмодеформационных волновых процессов неограниченно больших периодов (Долгих, 2000). С помощью этих приборов были зарегистрированы пульсирующие напряжения в верхней части земной коры на Урале, предвестники землетрясений в районе Байкальской рифтовой зоны и сопряженные с ними деформационно-волновые процессы в земной коре. Наряду с этим анализ трещиноватости и зеркал скольжения позволяет провести тектонофизические оценки палеонапряжений (Сим, 1991), а по сейсмологическим данным о механизмах очагов землетрясений можно получить характеристики современного поля напряжений. Данные о современных напряжениях дают возможность выделить из общей массы разломов те, которые могут быть активными и наиболее опасными (Rebetsky *et al.*, 2012; Ребецкий, Кузиков, 2016).

По результатам исследований на геодинамических полигонах производится районирование территории по изученным параметрам и их соотношениям, определяются аномальные (опасные) участки, выявляются закономерности формирования очагов землетрясений и крупных сейсмических (в том числе техногенных) событий для совершенствования методов их прогнозирования. В рамках этих исследований используются современные методы сейсотектоники (Палеосейсмология, 2011), а также методы интерпретации пликативных и дизъюнктивных структур, опирающиеся на результаты тектонофизического моделирования (Экспериментальная..., 1985).

Современные знания о природном напряженном состоянии недр Земли свидетельствуют о неоднородности действующих полей напряжений и изменении их под влиянием происходящих геологических процессов. Установлена взаимосвязь между напряженным состоянием и характером рельефа в областях активного горообразования, а также выполнены оценки величин напряжений в массивах в природном их состоянии, показавшие, что уровень девиаторных напряжений в коре внутриконтинентальных орогенов не превышает 500–700 бар, что на порядок выше напряжений в зонах субдукции океанических литосферных плит (Ребецкий, 2015).

Обнаруживается иерархичность распределения напряжений в пределах геологических структур и их неустойчивость по величине и направлению даже внутри отдельных блоков (Кузьмин,

Жуков, 2004). Инструментальными исследованиями на полигонах выявлен сложный спектр тектонических движений, неравномерно распределенных по дискретной, блочной среде. Установлены трендовые и колебательные смещения с различными периодами колебаний. Получено фундаментальное представление о том, что массивы горных пород находятся в процессе постоянного деформирования, что играет важную роль в решении проблемы прогнозирования опасных сейсмогеодинамических явлений (Сашурин, 2002). Выявлена смена геомеханического состояния рудных тел и вмещающих пород (Жиров и др., 2016), которая может быть связана с действующими в горном массиве остаточными напряжениями, обусловленными гравитационными силами.

В настоящее время происходит некоторый пересмотр взглядов на уровень и масштабы проявления современного геодинамического (сейсмодеформационного) состояния недр (Кузьмин, 2009). Понимая под современной геодинамикой деформационные и сейсмические процессы, протекающие в реальном масштабе времени, многие исследователи подчеркивают возрастающую роль геодинамического фактора при оценке опасности территорий размещения объектов повышенной техногенной и экологической нагрузки (Кочкин, Петров, 2015). Показано, что при математическом моделировании напряжений крайне важен учет того факта, что геологическая среда (в первую очередь, зоны разломов) может находиться в закритическом состоянии еще до приложения дополнительной нагрузки (Ребецкий, Лермонтова, 2014). Это приводит к резкому возрастанию дальнего действия влияния нагружения и его зависимости от геодинамического режима напряженного состояния (горизонтальное сжатие, растяжение и сдвиг).

Особое значение прогнозирование опасных явлений природного и техногенного происхождения имеет для объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). К ним, в частности, относятся предприятия по добыче, обогащению и переработке урановых руд (Инструкция..., 2000, Федеральные..., 2005). Среди геологических и инженерно-геологических процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения обязательному изучению и контролю в районе размещения ОИАЭ подлежат: сеймотектонические разрывные смещения, остаточные сейсмодетформации земной коры – сейсмодислокации; современные дифференцированные движения земной коры, тектонический крип; землетрясения (любого генезиса). Наряду с этим должен обеспечиваться мониторинг параметров процессов и явлений природного происхождения, а также периодический контроль факторов техногенного происхождения на всех этапах жизненного цикла ОИАЭ.

В этой связи в статье рассмотрены результаты разработки трехмерной модели напряженно-деформированного состояния (НДС) геологических структур СРП (ЮВ Забайкалье) – одного из ключевых объектов использования атомной энергии в России. Здесь ПАО “ППГХО” осуществляет добычу и переработку молибден-урановых руд уникальных по запасам месторождений. Результаты изучения современных сейсмогеодинамических процессов необходимы для обеспечения эффективности планирования и реализации мероприятий по рациональному недропользованию и экологической безопасности при освоении месторождений стратегического минерального сырья в сложных горно-геологических условиях СРП.

### ЦЕЛИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основная цель исследований – разработать трехмерную модель напряженно-деформированного состояния массивов пород СРП по комплексу данных о современных и палео-напряжениях, сеймотектонических деформациях поверхности с выделением и тектонофизической характеристикой активных разломов на основе анализа геолого-геофизических материалов и результатов полевого изучения геологических структур.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

разработка схемы разломной тектоники масштаба 1 : 200000 с участками детализации масштаба 1 : 500 на основе данных геолого-структурного, минералого-петрографического и структурно-петрофизического картирования основных разломных зон территории;

разработка схемы распространения сейсмодислокаций масштаба 1 : 200000 с участками детализации масштаба 1 : 500 на основе их картирования и данных структурно-геоморфологического анализа территории;

разработка схемы распределения сеймотектонических режимов (стресс-тензоров) масштаба 1 : 200000 по данным структурно-кинематического анализа разломно-трещинных зон;

создание трехмерной модели напряженно-деформированного состояния массивов пород по комплексу данных о современных напряжениях и сеймотектонических деформациях поверхности с выделением активных разломов и оценкой их сеймотектонического потенциала.

С учетом специфики геолого-тектонического строения территории работы были организованы по трем взаимосвязанным направлениям, каждое из которых характеризуется своим набором методов: геоструктурно-тектоническое, сейсмогеодинамическое и геодеформационное. Интеграция полученных результатов осуществлялась на единой информационной платформе с использова-

нием технологии трехмерной ГИС: лицензионные программы ArcGIS 10, MapInfo Professional 10.5 и Global Mapper 11.

*Геоструктурно-тектонические исследования* были направлены на определение особенностей разломной тектоники и закономерностей размещения тектонически активных разрывных структур, выделение основных этапов перестройки поля напряжений в литосферных блоках для проведения на ГИС-платформе районирования территории по геодинамической активности. Трехмерные модели геолого-тектонического строения литосферных блоков разрабатывались на основе полевого изучения разломной тектоники, геодинамической обстановки и напряженного состояния массивов горных пород тектонофизическими методами на эталонных месторождениях Стрельцовского рудного поля (Антей, Аргунское, Тулукуевское, Стрельцовское). Результаты геоструктурно-тектонических исследований являлись основой для работ по другим направлениям.

Основная задача *сейсмогеодинамических исследований* – локализация областей генерации разноточных сейсмических явлений в трехмерной модели геолого-тектонического строения литосферных блоков. Исходя из этого, исследования были направлены на создание модели развития геодинамических процессов и районирование территории по геодинамическим обстановкам, выяснение геодинамической природы сейсмически активных структур литосферы, их роли и места в геодинамической эволюции региона. Сейсмогеодинамические реконструкции охватили период времени от позднего кайнозоя до современности. Определялись условия и характер проявления сейсмодислокаций на земной поверхности с использованием данных дешифрирования материалов дистанционного зондирования, анализа рельефа земной поверхности и изучения индикаторов сейсмической активности в зонах разломов. Определение направлений и скоростей смещения поверхности геоблоков осуществлялось высокоточными методами GPS-геодезии.

Основная задача *геодеформационных исследований* – тектонофизическое моделирование напряженно-деформированного состояния массивов пород на изучаемой территории. Для расчетов использован пакет программ UWAY (Vlasov *et al.*, 2004), реализующий метод конечных элементов. Верификация результатов моделирования проводилась на двух уровнях: региональном и локальном. На региональном уровне детально (включая проходку канав и шурфов) изучались зоны разломов с выявленными в процессе моделирования деформациями растяжения, сжатия и сдвига. Одной из таких структур являлся Кличкинский разлом, для которого установлена активность с середины плиоцена до наших дней (~5 млн лет), вклю-

чая следы проявления сильного землетрясения – сейсмодислокации, датированные ранним голоценом (Чипизубов и др., 2013). На локальном уровне результаты моделирования верифицировались по данным многолетнего деформационного и сейсмоакустического мониторинга высоконапряженного массива горных пород эксплуатируемого урановорудного месторождения Антей (Рассказов и др., 2012, 2014).

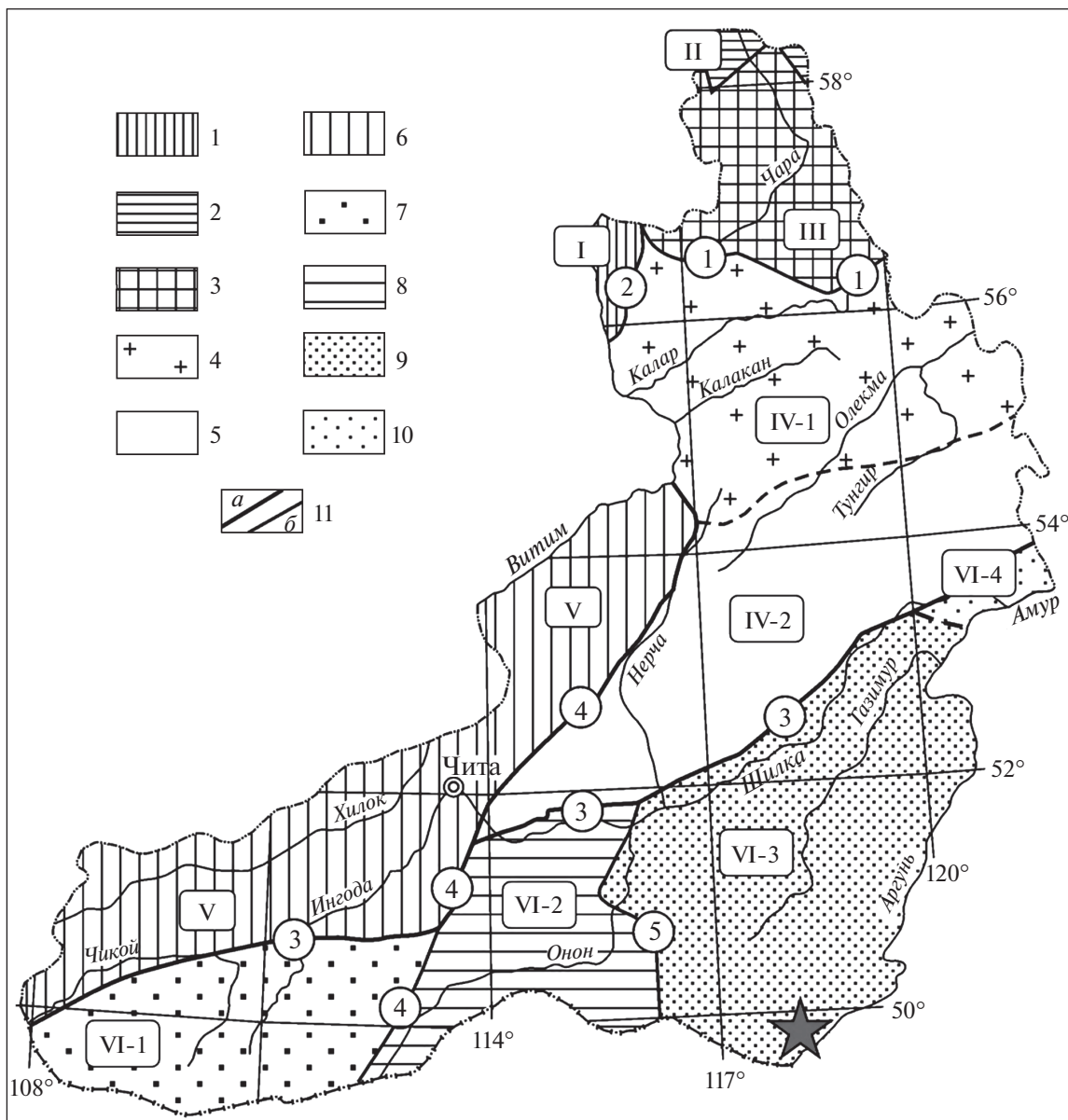
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аргунская структурно-формационная зона (или Приаргунский тектонический блок) – область широкого проявления процессов позднемезозойского магматизма, являющаяся частью Монголо-Приаргунского вулканического пояса на территории ЮВ Забайкалья (Геологическое..., 1997). Блок характеризуется ранней консолидацией доактивизационного фундамента (Андреева и др., 1996; Рыбалов, 2002; и др.) и развитием крупных вулканоогенных структур (Куйтунская, Стрельцовская, Куладжинская), образующих цепь в его южном обрамлении (Вольфсон и др., 1967; Соловьев и др., 1977; Ищукова и др., 2007; и др.).

Анализ геологического строения и тектонических элементов Аргунской структурно-формационной зоны (фиг. 1) показывает, что она преимущественно сложена домезозойскими орогенными образованиями с включениями вулканоплутонических комплексов различного (от допалеозойского до мезозойского) возраста. Эти комплексы, вероятно, коррелируют с палеозойскими (каледонскими и варисийскими) структурами, которые проявлены юго-восточнее на территории Китая в пределах Большого Хингана. Аргунская зона отделена от архей-протерозойских и палеозойских гранитоидных комплексов Становой области глубинной Монголо-Охотской сутурой, а ее Восточно-Агинской ветвью – от терригенных толщ Агинской зоны.

Наблюдаемое распределение комплексов гранитоидных и вулканоогенно-осадочных пород показывает, что в мезозойское время региональные структуры формировались в обстановке растяжения (рифтогенеза), а в послемезозойское время территория развивалась в платформенном режиме при кратковременной активизации тектонических процессов в связи с развитием Байкальской рифтовой зоны.

Анализ карт рельефа и гравитационных аномалий показал, что области относительного повышения интенсивности можно условно разделить на локализованные и протяженные (например, вдоль реки Аргунь и на северо-восток от населенного пункта Даурия). Области с уменьшением интенсивности соотносятся с протяженными впадинами, имеющими СВ-ЮЗ простирание. Это



**Фиг. 1.** Схема тектонического районирования Забайкалья (Геологическое..., 1997). 1 – Байкало-Витимская система, Муйская зона (I); Сибирская платформа: 2 – Березовская зона плитного чехла (II), 3 – Кодаро-Удоканская зона Алданского щита (III); Становая область: 4 – Каларская зона (IV-1), 5 – Западно-Становая зона (IV-2); 6 – Селенгино-Яблоновая область, Хилок-Витимская зона (V); Монголо-Охотская область и Аргунский массив: 7 – Хэнтэй-Даурская зона (VI-1), 8 – Агинская зона (VI-2), 9 – Аргунская зона (VI-3), 10 – Верхне-Амурская зона (VI-4); 11 – структурные границы: *a* – главные разломы, ограничивающие складчатые области, *б* – разломы второго порядка, ограничивающие структурно-формационные зоны (пунктир – предполагаемые). Цифры в кружках обозначают разломы: 1 – Становой, 2 – Витимо-Нерчинский, 3 – Монголо-Охотский, 4 – Онон-Туринский, 5 – Восточно-Агинский. Звездой отмечен район исследований.

направление свидетельствует о доминировании линейно вытянутых тектонических блоков, ограниченных СВ-ЮЗ разломами, в формировании блоковой структуры территории. Детальные гравиметрические данные показывают пониженные значения (около  $-50$  мГал) аномалий силы тяжести во впадинах и положительные аномалии уровня  $40$  мГал на поднятиях. Таким образом, об-

ласти повышенной интенсивности гравитационного поля хорошо коррелируются с областями поднятий в рельефе, сложенными гранитоидными породами различного возраста. Можно предположить, что формирование аномалии силы тяжести определяется, прежде всего, рельефом, а не особенностями регионального глубинного строения.

*Современные горизонтальные движения  
поверхности и напряженно-деформированное  
состояние пород*

Впервые проведенные измерения скоростей и направлений современных горизонтальных движений в районе СРП методом GPS-геодезии показали, что геодезические пункты, расположенные на бортах впадины Сухой Урулюнгуи, смещаются в восток-юго-восточном направлении (фиг. 2). Установлено, что скорости горизонтальных движений варьируют от 20 до 25 мм/год. Судя по большому эллипсу ошибок, измерения на пунктах проведены с недостаточной точностью. Необходимы дополнительные серии измерений для обеспечения достаточной точности в условиях малых деформаций, типичных для внутримитных областей.

Расчеты горизонтальных деформаций по данным GPS-наблюдений, выполненные с использованием триангуляции (расчет изменения длин сторон четырех треугольников, в вершинах которых находятся пункты GPS), показали, что для трех треугольников имеет место горизонтальное удлинение в направлении северо-запад (два треугольника) и север-северо-восток (один треугольник) при малой величине горизонтального сокращения в направлении северо-восток и восток-юго-восток соответственно (см. фиг. 2). Если предположить, что тектонические деформации не приводят к изменению объема, то для этих треугольников максимальное укорочение действует в вертикальном направлении. Таким образом, здесь имеет место геодинамический тип напряженного состояния горизонтального растяжения. Еще один треугольник рассчитываемых деформаций дал максимальное сокращение в направлении на северо-запад при очень небольшом удлинении в северо-восточном направлении, что противоречит данным для трех других треугольников. Для четвертого треугольника, используя сделанное выше предположение, находим, что максимальное удлинение ориентировано вертикально. Это отвечает геодинамическому режиму горизонтального сокращения.

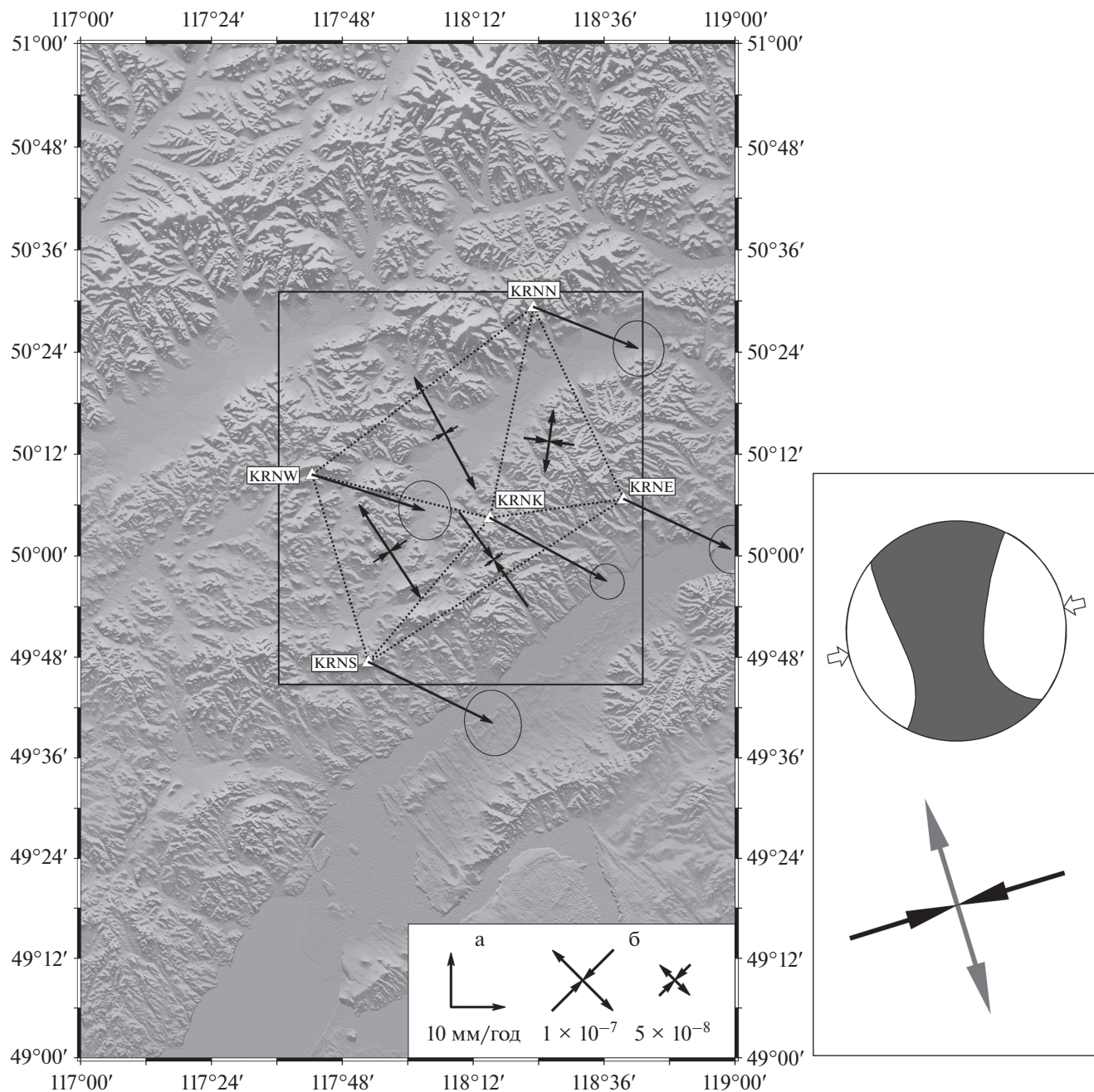
Столь существенные различия в режимах напряженного состояния смежных блоков земной коры находят свое объяснение в результатах тектонофизических реконструкций современного напряженного состояния внутриконтинентальных орогенов Алтае-Саянской области и Северного Тянь-Шаня. В работе (Rebetsky *et al.*, 2012) показано, что в областях хребтовых поднятий преобладает обстановка горизонтального сжатия или сдвига (транспрессии), а в прогибах и низменностях преобладает обстановка горизонтального растяжения или сдвига (транстенсии).

Следует отметить, что пункты GPS-наблюдений расположены на горных хребтах. Площади, для которых оценивались скорости перемеще-

ний дневной поверхности, включают горные поднятия и области впадин, рассеченные тектоническими разломами. Только треугольник из станций KRNS—KRNK—KRNE отражает современные перемещения по станциям, которые расположены в пределах одного горного сооружения, когда базовые линии не пересекают впадины. Только для этого блока, включающего Стрельцовское рудное поле, получен режим горизонтального сокращения. Данные по скоростям современных горизонтальных движений и ориентация осей деформаций укорочения и удлинения в районе г. Краснокаменска используются нами для формирования расчетной модели современного НДС массивов пород Стрельцовского рудного поля.

Исследуемая область (согласно Комплект..., 1999) характеризуется слабой сейсмичностью. Поэтому для оценки современного НДС массивов пород по данным о механизмах очагов землетрясений рассмотрена обширная территория с координатами  $44^{\circ}$ – $54^{\circ}$  с.ш.,  $110^{\circ}$ – $124^{\circ}$  в.д. Всего на этой территории, по различным литературным источникам, известны решения фокальных механизмов для семнадцати событий, причем для четырех из них решения получены несколькими разными методами. Анализ стереограмм фокальных механизмов и их классификационных диаграмм показал, что большинство землетрясений характеризуется сдвиговым типом смещения в очаге, есть несколько событий взбросового типа и два землетрясения сбросового типа. По данным о механизмах очагов землетрясений определены средний механизм и ориентация осей главных напряжений сжатия и растяжения исследуемой территории по методу С.Л. Юнги (1990). Полученные результаты показывают, что средний механизм близок к сдвиговому типу. Оси сжатия и растяжения близгоризонтальны, ось сжатия субширотна, ось растяжения – близмеридиональна (см. фиг. 2).

При использовании данных наблюдений для выяснения геодинамической обстановки в ЮВ Забайкалье отметим вывод, полученный для Байкальского геодинамического полигона, сеть GPS в пределах которого насчитывала до 20 станций (Саньков и др., 1999, 2005; Лухнев и др., 2010). Он состоит в том, что не исключается из рассмотрения вероятное влияние на горизонтальные движения в Байкальском рифте внутреннего подлитосферного источника – подъема и растекания вещества аномальной мантии. Хотя, как показали расчеты (Lesne *et al.*, 1998), современные деформации могут быть объяснены воздействием одних только горизонтальных усилий от удаленных источников на границах плит. Таким образом, обособленное рассмотрение современных деформаций даже в рамках более протяженного полигона не позволяет однозначно ответить на вопрос о причинах наблюдаемых деформаций, а также



**Фиг. 2.** Современное напряженно-деформированное состояние ЮВ Забайкалья. Слева – скорости современных горизонтальных движений и относительных деформаций геодезической сети в районе Стрельцовского рудного поля: а – векторы скорости движений (в мм/год) GPS-пунктов (KRNN, KRNW, KRNE, KRNS, KRNK) по данным измерений за 2011–2013 гг. в международном отчетном основании ITRF2008, в 95% доверительном интервале; б – скорости главных горизонтальных деформаций (в мм/год  $\times 10^{-1}$ ). Сходящиеся стрелки – оси укорочения, расходящиеся стрелки – оси удлинения. Квадратом обозначена площадь полигона наблюдений и тектонофизического моделирования (объяснения в тексте). Справа – средний механизм землетрясений (вверху) и ориентировка (внизу) осей главных напряжений сжатия (сходящиеся стрелки) и растяжения (расходящиеся стрелки) в районе.

связать их с блоковым перемещением, вызываемым удаленными источниками, в качестве которых можно рассматривать границы тектонических плит.

Из материалов, представленных в (Саньков и др., 1999), также следует, что при численном мо-

делировании на эквивалентной модельной среде возникает необходимость определения модели нагружения, которая включает в себя внутренние и внешние нагрузки. Нагрузки могут задаваться в перемещениях, давлениях и силах на границах тектонических блоков, а также как внутренние, кото-

рые формируются плотностными неоднородностями, влиянием температурных воздействий на геоматериал и распределением напряжений с учетом реологических особенностей горных пород, являющихся реакцией на внешнее воздействие. Важную роль в формировании современных структур играют эрозия и осадконакопление, температурное поле (например, в связи с вулканической активностью), флюидодинамические и другие явления (Шерман, 2009).

В природной среде формирование существующего НДС и геодинамических явлений происходит из-за постепенного и одновременного воздействия всех указанных нагрузок на фоне эволюции строения и свойств комплексов пород на протяжении всей истории развития наблюдаемой современной структуры. Разделение влияния внешних и внутренних нагрузок при моделировании является некоей принимаемой абстракцией, необходимой для проведения численных расчетов, и обуславливается полнотой современных знаний о геолого-геофизических и геодинамических особенностях рассматриваемого объекта. Это и обуславливает важность предварительного рассмотрения геофизических особенностей, геодинамики и тектоники региона.

Приведенные данные позволяют заключить, что основными структурными элементами территории являются разломы и комплексы пород, слагающие поднятия и впадины СВ-ЮЗ простирания. Эти структуры хорошо выражены в геологическом строении, рельефе, гравитационных и магнитных аномалиях.

В работах по разломной тектонике и напряженно-деформированному состоянию пород в районе СРП (Петров, 2007; Петров и др., 2010) выделяются следующие эпизоды формирования современной геотектонической структуры:

в период дорудной (домезозойской) подготовки преобладал режим купольного поднятия с дополнительной субмеридиональной компонентой сжатия;

в позднеэриасовое-среднеюрское время произошла инверсия тектонических напряжений, вызванная перестройкой глобального поля тектонических напряжений в регионе (Delvaux *et al.*, 1995, 1997). На этом этапе тектогенеза ориентировка оси горизонтального сжатия (максимального сжимающего напряжения) меняется с субмеридиональной на субширотную. Вдоль Восточно-Урулюнгуевской и Южно-Аргунской трансблоковых зон разломов реализуются правосторонние сбросо-сдвиговые смещения с сопутствующим развитием трансформной долины, в пределах которой формировались субпараллельные системы разломов, ограничивающие тектонические блоки проявившейся здесь структуры типа пулл-апарт;

в позднеюрское-раннемеловое время формировалось локальное купольное докальдерное поднятие, в осевой части которого получила развитие субширотная цепочка вулканических аппаратов (Аэродром, Красный Камень, Малый Тулукуй). Их извержения привели к опустошению магматической камеры, проседанию поверхности, формированию кальдеры и ее заполнению осадочно-вулканогенным материалом. За пределами кальдеры образовалась компенсационная впадина (Сухой Урулюнгуй). После кальдерного обрушения происходила локализация руд жильно-штокверковых и пластовых месторождений СРП.

Таким образом, в каркасе региональных разрывов система СВ-ЮЗ разломов может считаться основной, которая в сочетании с разломами субширотного и субмеридионального простирания была сформирована на самых ранних этапах тектогенеза и становления комплексов гранитоидных пород. Вертикальные движения, выраженные в локальном проявлении вулканизма с формированием кальдерных построек (Стрельцовская и Куйтунская кальдеры), приводили к развитию изостатически-скомпенсированных геологических структур (например, впадина Сухой Урулюнгуй).

На основании геоструктурных исследований и геолого-тектонического анализа территории, а также по результатам структурно-геоморфологического метода предполагается отсутствие значимых вертикальных блоковых движений за счет крупных поднятий на неотектоническом этапе тектогенеза. Наряду с этим, вопрос о структуре неотектонического поля напряжений пока остается открытым. Статистически большая часть решений для позднего кайнозоя по методу Л.А. Сим (2011) указывает на растяжение в северо-западном и на сжатие в северо-восточном направлениях. Современное напряженное состояние, по данным о механизмах очагов землетрясений, определяется ССЗ-ЮЮВ растяжением и ВСВ-ЗЮЗ сжатием. По предварительным данным GPS измерений, во впадине Сухой Урулюнгуй удлинение направлено на ССВ-ЮЮЗ, а сжатие на ЗСЗ-ВЮВ. Если принять, что Кличкинская сейсмодислокация являлась в голоцене взбросом со сдвиговой компонентой, то среднее сжатие в позднем кайнозое могло быть от субмеридионального до северо-восточного, что наиболее вероятно.

#### *Тектонофизическое моделирование напряжений земной коры*

Можно выделить два основных подхода в исследованиях напряженного состояния массивов горных пород:

по данным о природных напряжениях, изучаемых методами полевой тектонофизики (Гзовский, 1975; Гинтов, 2005);



по данным изучения эквивалентной модельной среды методами физического (Михайлова, 1989; Осокина, 1963; Борняков, 1980) или численного (Стефанов, 2008) моделирования.

Методы полевой тектонофизики, как правило, применяются для решения “обратной задачи” – восстановления истории формирования современного поля напряжений по системам трещин разного ранга совместно с методами структурных исследований. Итогом является геологическая модель формирования современной геотектонической структуры, на основе которой объясняется генезис формирования современного поля напряжений. Обзоры этих методов можно найти в (Ребецкий, 2002; Сим, 2011, 2013; Никонов, 2011).

Методы тектонофизического анализа, предполагающие проведение численных расчетов с использованием современных вычислительных комплексов, направлены на решение “прямой задачи” – по имеющейся эквивалентной модели геологической среды необходимо определить НДС пород и провести его тектонофизическую интерпретацию (Погорелов и др., 2010; Войтенко и др., 2013). При этом изучение реологических свойств горных пород и качественное моделирование характерных явлений (например, процессов разломообразования в литосфере) связаны с лабораторным моделированием на образцах горных пород и с использованием эквивалентных материалов (Борняков, 2012).

Проведение анализа методами численного моделирования предполагает следующие три стадии:

построение эквивалентной численной модели среды;

проведение вычислений и корректировка первоначальной модели;

интерпретация полученных результатов (особенностей рассчитанного НДС) совместно с данными по геолого-геофизическим особенностям геологического объекта и результатами определения поля напряжений и деформаций другими методами, например, полевой тектонофизики.

Далее в изложении будем придерживаться указанной последовательности.

На *первой стадии* предполагается создание двух предварительных моделей:

модель строения и свойств создается на основе геолого-геофизических данных. Принимаются определяющие соотношения и реологические связи. Предполагается, что такая модель должна адекватно отражать гравитационное напряженное состояние;

модель граничных условий строится на основе анализа региональной геодинамики, сейсмического режима и характера современных движений по данным космической геодезии и дистанционного зондирования. Определяются гранич-

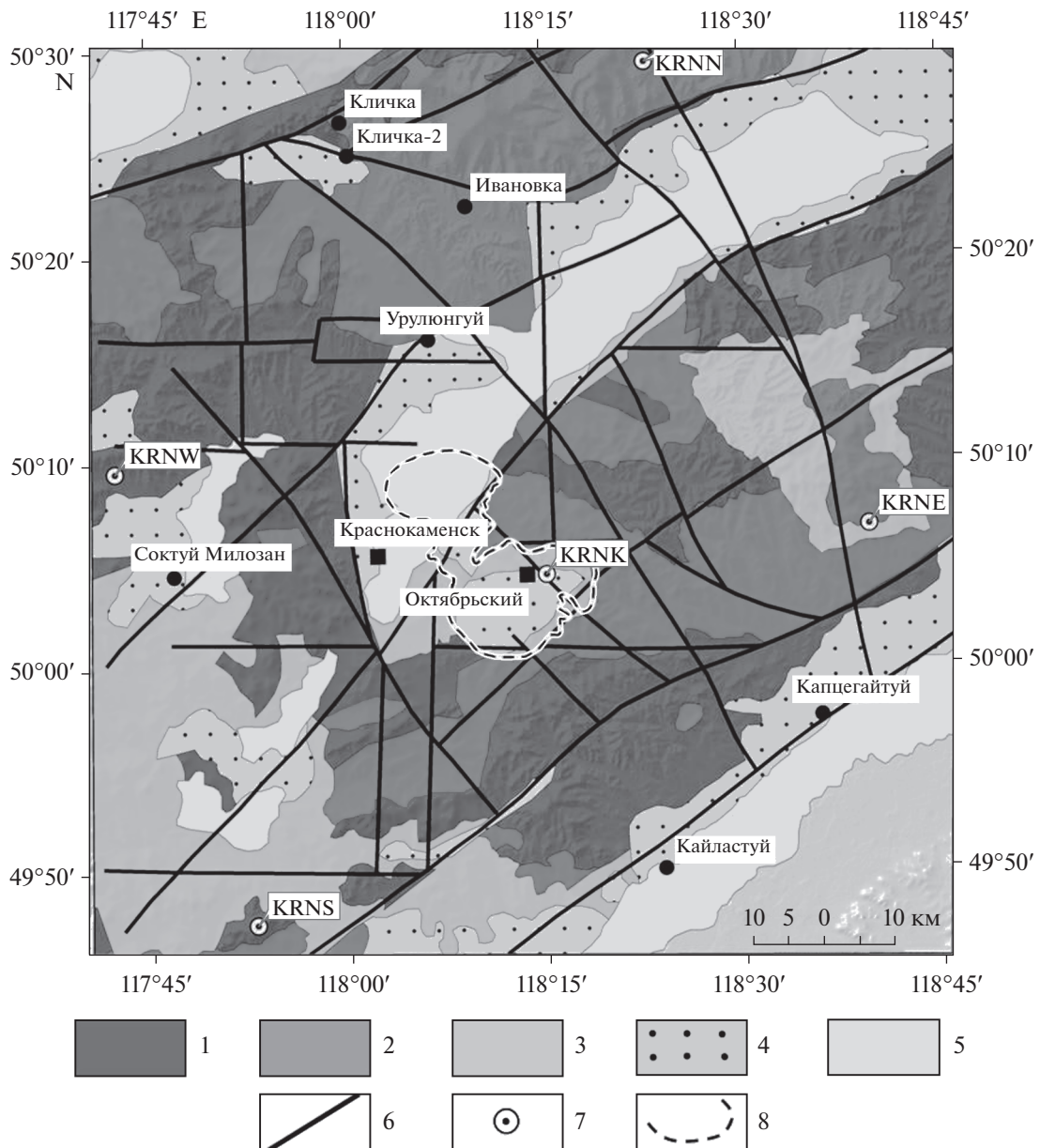
ные условия (эволюция граничных условий). Они формируют вклад тектонических и дополнительных экзогенных (техногенных) нагрузок. Проблема состоит в том, что оценить вклад тектонических напряжений, и тем более их эволюцию в процессе формирования геотектонической структуры, зачастую довольно сложно.

На *второй стадии* проводятся численные расчеты. Полученное напряженное состояние анализируется на соответствие природным данным о напряжениях, например, по методу катакластического анализа (МКА) – при наличии достаточных данных о региональной сейсмичности, либо с использованием определений по сколовым трещинам по модификации МКА (Ребецкий, 2011). Также привлекаются дополнительные данные о геолого-тектонических особенностях строения рассматриваемой структуры. Осуществляется оценка корректности созданной модели.

На *третьей стадии* производится всесторонний анализ предпочтительных вариантов моделирования, выявляются закономерности, имеющие геолого-геофизический, геотектонический и геодинамический смысл.

Необходимо отметить, что при изучении механизмов деформирования природного объекта по набору геологических, геофизических или тектонофизических данных решается обратная задача геодинамики, состоящая в нахождении силового источника нагружения участка земной коры. Это требует перебора множества решений прямых задач геомеханики. Однако при узком наборе параметров, сложности сравнения результатов моделирования и реалий природного объекта единственности решения не достигается (Ребецкий, 2015). Она может быть достигнута путем привлечения дополнительных параметров сравнения, например, данных по палео- и современным напряжениям (ориентация главных осей напряжений), а также по гравитационным аномалиям.

Следует также отметить, что важную роль при геомеханическом моделировании играет правильность выбора определяющих решение прочностных параметров. Помощь здесь оказывают данные лабораторных экспериментов по разрушению пород и результаты тектонофизических исследований напряжений (Ребецкий, 2011, 2015; Ребецкий, Кузиков, 2016). Крайне важен в расчетах учет разупрочняющего влияния флюидного давления, формирующегося в трещинно-поровом пространстве пород за счет действия закона Дарси. В первом приближении учет флюидного давления возможен путем снижения величины коэффициента внутреннего трения пород (Погорелов и др., 2010).



**Фиг. 3.** Схема геологических формаций и разломов района Стрельцовского рудного поля. 1 – AR-PZ1 гранито-гнейсы и магматиты, 2 – PZ2-MZ граниты, 3 – MZ вулканогенно-осадочные комплексы, 4 – К осадочно-вулканогенные комплексы, 5 – N-Q осадки, 6 – основные зоны разломов, 7 – пункты GPS-геодезии, 8 – контур урановмещающей Стрельцовской кальдеры.

*Тектоническое строение территории  
как база для эквивалентной численной модели*

На основе обобщенной схемы распространения геологических формаций и главных разломов (фиг. 3) была создана принципиальная двумерная и трехмерная модели территории.

Учитывая поперечные размеры моделируемой области, в рамках региональной модели были сделаны следующие допущения:

ввиду малой мощности различных осадочных отложений в модели не производилась диффе-

ренциация осадочных пород по генезису. Осадочные комплексы были заменены единым эквивалентным материалом;

ввиду слабой дифференцированности геомеханических свойств домезозойских гранито-гнейсов и интрузивных пород гранитного ряда их свойства заменены усредненными значениями;

рельеф схематизирован и отражает наиболее значительные морфоструктурные особенности поверхности;

разломные линеаменты были заменены “разломным телом” (Романюк и др., 2013; Войтенко и др., 2013). В областях примыкания и пересечения разломов их положение на поверхности было откорректировано таким образом, чтобы избежать возникновения конечных элементов “плохой” геометрии (наличие малых углов между соседними сторонами элементов) численной модели;

предполагается, что “разломное тело” транслируется на всю моделируемую глубину (до 10 км). Особенности смещения по разлому контролируются горизонтальными тектоническими движениями и изменением значений литостатического давления с глубиной.

Первые три допущения связаны с желанием избежать появления структурных областей с малой мощностью, которые привели бы к появлению конечных элементов с соотношением сторон менее 1 : 5, что является неблагоприятным для проведения расчетов.

Указанные особенности не приводят к ограничению общности на полученные результаты для геоструктуры с принятой геометрией разломов.

Структура “разломного тела” принимается аналогичной (Chester *et al.*, 2005), обсужденной в работе (Романюк и др., 2013): несмотря на то что зона главного сместителя разлома, локализирующая тектоническое скольжение, имеет характерную ширину в 0.5–2 м, тем не менее, разлом помещен в ядро, состоящее из пород, подвергнутых интенсивной деформации и разрушению. Эта область характеризуется пониженными сейсмическими скоростями и повышенным поглощением сейсмических импульсов, пониженным электрическим сопротивлением и повышенной пористостью (Ben-Zion, 1998; Ben-Zion, Sammis, 2003). Эти данные хорошо коррелируются с результатами изучения активных разломов (Кузьмин, Жуков, 2004) и физического моделирования процессов разломообразования с использованием эквивалентных материалов (Семинский и др., 2013). Тело разлома имеет характерную ширину в первые сотни метров. Сдвиговые смещения по разломам в основном связаны с наличием в теле разлома “слабых” минералов, повышенной флюидонасыщенностью и т.д. В нашем случае обозначим роль разломных линеаментов – при моделировании они будут рассматриваться лишь как структурные элементы, необходимые для относительного сдвига линеаментов тектонических блоков. Напряжения, получаемые в разломных зонах, не будут рассматриваться при анализе итогового поля напряжений.

Также в качестве исходных данных для численного моделирования использовались результаты анализа поля тектонических напряжений по структурно-геоморфологическому методу (Сим, 2011, 2013). В ходе реконструкции напряженного

состояния по разрывным линеаментам были получены ориентировки осей сжатия и растяжения в проекции на горизонтальную плоскость. Наличие ортогональных осей сжатия указывает на трехосное напряженное состояние пород (фиг. 4).

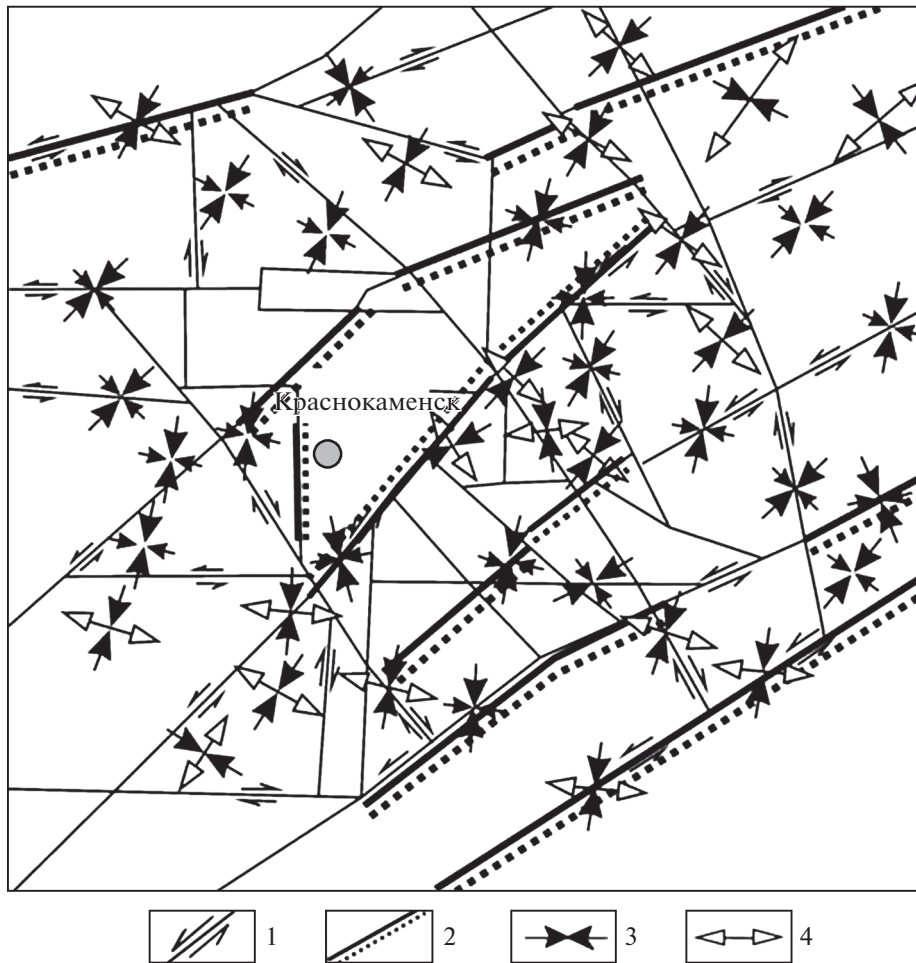
Анализ расположения сбросов показывает, что ситуации, когда падающие крылья примыкают к впадине с противоположных ее сторон, очень редки. Поэтому можно предположить, что межгорные впадины образовались, в основном, в ходе вертикальных перемещений подстилающего структурного слоя. Данная обстановка могла быть реализована также при вертикальном поднятии горных массивов, в результате чего могли формироваться сбросы с последующим углублением межгорных впадин и заполнением их осадками. Если указанные перемещения вызывались подъемом интрузивного вещества, они могли иметь меньший градиент внутри Аргунской структурно-формационной зоны, что привело бы к отсутствию ярко выраженных сбросов, оконтуривающих горные массивы. Безусловно, для обоснования подобного предположения необходимы дополнительные геолого-геофизические данные. В наших исследованиях эта гипотеза была проверена в ходе численного 3D-моделирования.

На схеме разломов (см. фиг. 4) видно, что обстановка левостороннего сдвига преобладает в разломах СВ-ЮЗ простирания. Такая обстановка говорит о ведущей роли одноосного сжатия в направлении ССВ-ЮЮЗ. Ориентировки проекций осей главных напряжений приведены на сетке разломов, выделенных для численного моделирования.

На основе комплекса геофизических данных, в том числе электроразведки и радоновой съемки, показана возможность субвертикального залегания разломных областей (тел разломов) на глубины до 10 км (Семинский и др., 2013). Эта модель хорошо соотносится с геологическими представлениями о распространении межблоковых разломов Приаргунского тектонического блока на глубину, которые подтверждаются геофизическими данными (Духовский и др., 1998). При построении численной модели геоструктуры мы придерживались допущения о наличии крутопадающих (вертикально – без ограничения общности) межблоковых разломных тел, простирающихся на всю мощность рассмотрения (10 км), хотя некоторые структуры, например Кличкинский разлом, могут являться взбросо-сдвигами.

#### *Строение и свойства среды для моделирования тектонических напряжений*

Петрофизические свойства горных пород выбились как характерные для соответствующего минерального состава с использованием данных экспериментов на образцах горных пород, а также



**Фиг. 4.** Схема разломов с указанием ориентировок главных напряжений и кинематики разломных зон неотектонического этапа тектогенеза, восстановленных структурно-геоморфологическим методом (Сим, 2011). Сетка разломов создана по геологическим материалам масштаба 1 : 200000–1 : 50000, результатам дешифрирования карт рельефа и космоснимков (по материалам Петров и др., 2010 с дополнениями). 1 – основные разломы и направления смещения их крыльев, 2 – наиболее крупные сбросы, пунктир показывает падающее крыло, 3 – оси сжатия, 4 – оси растяжения.

на основе реологических параметров, использовавшихся для расчета гравитационных напряжений верхних слоев земной коры для области, вмещающей месторождения Стрельцовского рудного поля (Петров и др., 2014, 2015; и др.).

Расчетная 3D-модель состоит из более чем 40000 элементов, грани которых преимущественно имели трех- и четырехугольную форму. Характерный размер элемента модели – 2 км.

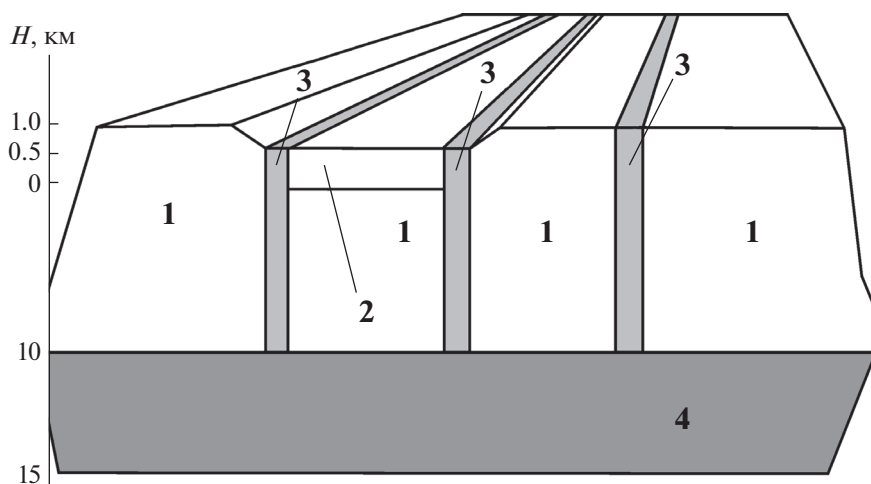
Области разломов определены шириной в плане 400 м. Узлы модели создавались сначала на областях гранитоидного массива (фундамента), затем из них генерировалась сетка на областях разломов. 3D-модель имеет три принципиально важных для моделирования слоя:

высоты 1000–0 м над уровнем моря (условно) – включает в себя генерализованный рельеф, учитывает приповерхностные неоднородности в соответствии со схемой строения территории. Моде-

лируется пластическим телом Друккера–Прагера (учет влияния обжимающего давления на разрушение);

глубины 0–10000 м – гранитоидная рама с разломной структурой. Разломы простираются на всю глубину модели вертикально ввиду отсутствия детальных данных об их углах падения. Структурные области моделируются пластическим телом Друккера–Прагера;

глубины 10000–15000 м – подстилающая структурная область (область 4 на фиг. 5 и в табл. 1) введена в модель для задания дополнительных вертикальных нагрузок (в перемещениях). Здесь реализуется пластичность по Мизесу (пластические деформации развиваются, если возникающие касательные напряжения превышают предел пластичности, коэффициент внутреннего трения = 0).



**Фиг. 5.** Схематический вертикальный профиль, отражающий строение моделируемой геотектонической структуры. Свойства материалов для слоев модели определены в соответствии с номерами в табл. 1.

На фиг. 6 представлен план каркаса основных разломных зон района СРП. Расчетная сетка в 3D реализации приведена на фиг. 7.

*Выбор модели нагружения и результаты двумерного моделирования*

Оценить вклад тектонических напряжений, и тем более их эволюцию в процессе формирования геотектонической структуры зачастую довольно сложно.

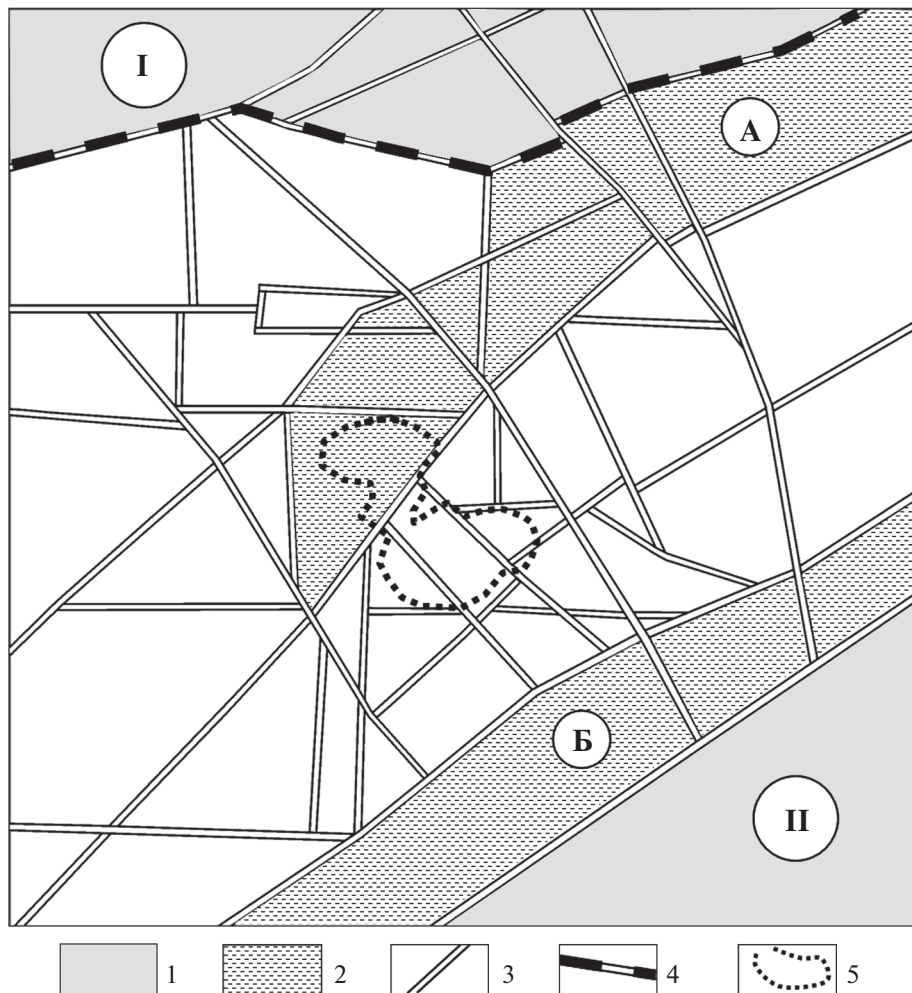
Рассмотрим способ оценки внешних (дополнительных) тектонических напряжений при от-

сутствии явных данных о геодинамике моделируемой области. Для этого на плоской двумерной модели, секущей геоструктуру в плане, предварительно оценим влияние некоторых граничных условий, которые определенным образом можно соотносить с вероятными тектонодинамическими обстановками в изучаемой области. Предположения для формирования граничных условий основаны на характере поведения (реологии) образцов горных пород (по экспериментальным данным), тектонических движениях и возможных деформационных воздействиях в районе СРП.

**Таблица 1.** Свойства материалов, принятые в численной модели разломно-блоковой структуры района Стрельцовского рудного поля

№	Геологические формации	Плотность, г см <sup>-3</sup>	Модуль Юнга, ГПа	Коэфф. Пуассона, безразм	*Угол внутреннего трения φ <sub>DP</sub> , град	Предел пластичности (катаклизического течения), ГПа
1	AR-PR-PZ1 – гранито-гнейсы и комплексы магматических пород, PZ(MZ) гранитоиды (интрузии)	2.55	80	0.20	2.9	0.09
2	MZ (J3-K1) вулканогенно-осадочные комплексы, K1 осадочно-вулканогенные комплексы, N-Q отложения	2.45	40	0.30	7.4	0.04
3	Разломные зоны	2.40	10	0.35	17.5	0.01
4	Гранито-гнейсы, гранитоиды и метаморфиты структурной области на глубинах 10–15 км	2.65	120	0.25	0	0.015

Примечание. \* Угол внутреннего трения φ<sub>DP</sub> связан с углом внутреннего трения при хрупком разрушении φ<sub>C</sub> и коэффициентом сцепления по Кулону k соотношением:  $\alpha = \text{tg}(\varphi_{DP}) = \frac{2 \sin(\varphi_C)}{\sqrt{3}(3 - \sin(\varphi_C))}$ ,  $k = \frac{6c \cos(\varphi_C)}{\sqrt{3}(3 - \sin(\varphi_C))}$ .



**Фиг. 6.** План разломной структуры, на основе которого создана расчетная модель для изучения поля тектонических напряжений. Каркас разломов представлен на фиг. 3 и 4. 1 – тектонические блоки: I – Газимурско-Кличкинский, II – Северо-Хинганский; 2 – межгорные впадины: А – Сухой Урулюнгуй, Б – Южно-Аргунская (долина р. Аргунь), 3 – основные межблоковые разломы, 4 – Кличкинский разлом (сейсмодислокация); 5 – контур Стрельцовской кальдеры.

Заметим, что область анализа напряженного состояния отстоит от внешних границ представленной схемы разломов (см. фиг. 3 и 4). Таким образом, можно ожидать, что корректные амплитуды горизонтальных перемещений на границах не будут искажать результата в области анализа. Также будет внесено некоторое боковое сопротивление при отсутствии граничных условий закрепления на вертикальных границах, что реализует продолжение блоков, ограниченных разломами СВ-ЮЗ простираения, в направлении по простиранию “на бесконечность”.

Рассмотрим модели краевых условий и расчеты для вертикального (по отношению к листу, совпадает с направлением север-юг) обжатия с комбинациями дополнительного бокового подпора и составляющей по левому сдвигу. Результаты расчетов отражались на следующих графических материалах:

схема нагружения. Горизонтальная составляющая равна половине вертикальной компоненты. Амплитуда смещения по вертикали 250 м;

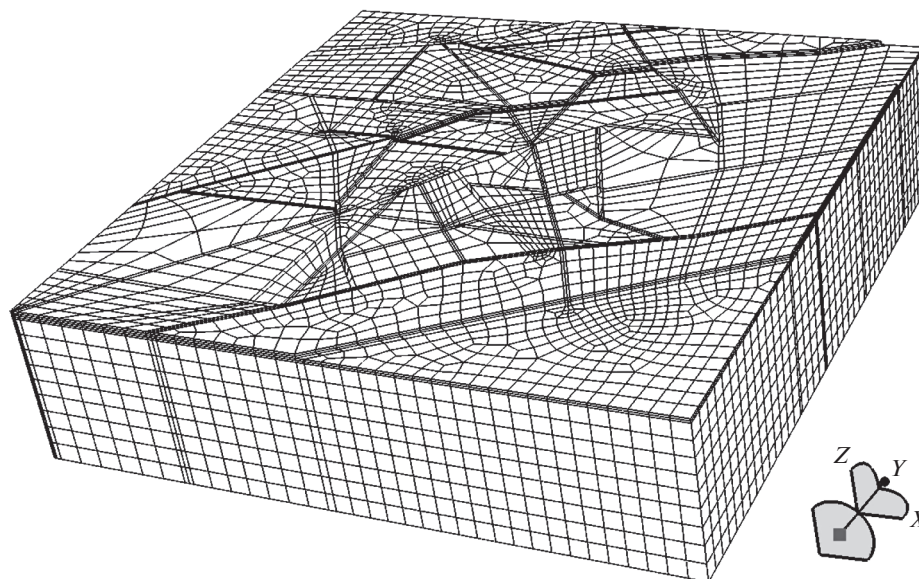
амплитуда перемещения (м). Короткими отрезками обозначались направления перемещений дневной поверхности, утолщенными ломаными – траектории перемещений;

тектоническое давление (МПа);

максимальные касательные напряжения (МПа);

коэффициент Лоде–Надаи, либо объемные деформации (в некоторых случаях);

проекции осей главных напряжений (алгебраически максимального и минимального) на горизонтальную плоскость, совмещенные с сеткой разломов с указанием ориентировок главных напряжений и кинематики разломных зон на неотектоническом этапе тектогенеза, установлен-



Фиг. 7. Модель конечных элементов, созданная для 3D-анализа напряженного состояния верхней части земной коры геотектонической структуры, вмещающей Стрельцовское урановорудное поле. Ось  $Y$  указывает на север.

ные с помощью структурно-геоморфологического метода.

По вертикальной и горизонтальной осям графических изображений обозначались линейные размеры в км. Положение реки Аргунь совпадает с разломным линеamentом СВ-ЮЗ простираения, ограничивающим Северо-Хинганский тектонический блок (ТБ) (см. фиг. 6).

В качестве характерных особенностей тектонического строения района СРП, которые учитывались при выборе граничных условий, выделим следующие:

Северо-Хинганский ТБ (блок в юго-восточном углу модели) обеспечивает обстановку левого сдвига;

Газимурско-Кличкинский ТБ (блок в северо-западном углу модели) также обеспечивает обстановку левого сдвига;

система разломов СЗ-ЮВ простираения является более “молодой” по сравнению с системой разломов СВ-ЮЗ простираения, широтных и меридиональных разломов;

система разломов СВ-ЮЗ простираения является основной системой разломов, в рамках которой, в целом, наблюдается обстановка левого сдвига;

во впадине Сухой Урулюнгуй (район пос. Досатуй) присутствует обстановка горизонтального растяжения (см. фиг. 4).

Рассмотрим некоторые характерные результаты расчетов НДС массивов пород с учетом особенностей кинематики разломных зон территории. Свойства пород в зонах разломов (см. табл. 1) подбирались таким образом, чтобы можно было не

только реализовать эффекты пластического течения, но и проанализировать полученную картину на предмет выявления закономерностей нагружения, приводящих к возникновению наблюдаемых (и проверяемых в полевых условиях) деформаций. Все расчеты проводились в динамике — модель постепенно подвергалась возрастающей по амплитуде нагрузке.

Результаты расчетов показали хорошую преемственность в изменении характеристик НДС. Ввиду отсутствия выраженных структурных границ за пределами тектонических блоков, к которым прилагалось нагружение, остальные границы не были закреплены: считалось, что такой вариант краевых условий обеспечит унаследованность выявленной линейности тектонических блоков в СВ-ЮЗ направлении. Также предполагалось, что отсутствие бокового отпора со стороны внешних тектонических структур частично может быть компенсировано конечными перемещениями вдоль разломов в горизонтальной плоскости.

Тем не менее, воздействие, прилагаемое на клиновидный блок Северо-Хинганского ТБ в большинстве вариантов расчета (А-Е), начиная со второго шага нагрузки, приводило к локализации воздействия в полосе, ограниченной крайним разломом СЗ-ЮВ простираения и восточной боковой границей модели. Практически во всех указанных случаях модель разрушалась на третьем или четвертом шаге нагрузки.

Ввиду унаследованности пространственного распределения анализируемых характеристик для выявления наиболее вероятной схемы тектониче-

**Таблица 2.** Варианты краевых условий нагружения для 2D-моделирования

Вариант	Краткая характеристика способа нагружения и моделируемый процесс
A	Вертикальное давление на границы ТБ при свободных боковых границах. Моделирование перемещений блоков вдоль ограничивающих их региональных разломов
B	Вертикальное давление на границы ТБ при фиксированных боковых границах. Моделирование отсутствия горизонтальных перемещений блоков
C	Вертикальное давление со стороны Северо-Хинганского ТБ при фиксированных остальных боковых границах. Моделирование отсутствия перемещений вдоль границ блоков
D	Вертикальное и горизонтальное давление на боковые границы ТБ. Моделирование регионального сжатия в СЗ-ЮВ направлении
D1	Вертикальное и горизонтальное давление на боковые границы Северо-Хинганского ТБ в сочетании с вертикальным давлением и горизонтальным перемещением Газимурско-Кличкинского ТБ. Моделирование несоосного регионального сжатия
E	Вертикальное давление на границы Северо-Хинганского и Газимурско-Кличкинского ТБ при разнонаправленных перемещениях боковых границ. Моделирование крутящего сжатия против часовой стрелки, т.е. в целом, СВ-ЮЗ регионального сжатия
F	“Избыточная” нагрузка на северной границе Газимурско-Кличкинского ТБ в сочетании с сжимающей нагрузкой на остальные границы. Моделирование несоосного регионального сжатия и левосторонних смещений вдоль Кличкинского разлома
F1	“Избыточная” нагрузка на северной границе Газимурско-Кличкинского ТБ в сочетании с сжимающей нагрузкой на остальные границы. Моделирование соосного регионального сжатия и сжатия в зоне Кличкинского разлома
F3	“Избыточная” нагрузка на северной границе Газимурско-Кличкинского ТБ в сочетании с горизонтальным смещением боковой границы. Моделирование несоосного регионального сжатия и левосторонних смещений вдоль Кличкинского разлома
F5	“Избыточная” нагрузка на северной границе Газимурско-Кличкинского ТБ в сочетании с сжимающей нагрузкой на остальные границы. Моделирование соосного однонаправленного перемещения блоков

ских нагрузок ограничимся рассмотрением результатов расчета только первого шага нагружения, считая, что в геологической среде реализуется пластическое течение по разломам, но при этом не возникает больших деформаций и нарушения сплошности модели. Моделирование проведено для десяти вариантов краевых условий нагружения (табл. 2).

Приведем краткое описание вариантов нагружения. *Вариант нагрузки А* – угловые блоки под вертикальной нагрузкой перемещаются вдоль ограничивающих их разломов. Очевидно, что такой тип нагрузки удовлетворяет обстановке левого сдвига по ограничивающим разломам, а также предположению о вероятной осевой сжимающей нагрузке в субмеридиональном направлении. При выбранных условиях закрепления (свободные поверхности по границам, ортогональным границам приложения нагрузки) очевидно, что северо-восточный и юго-западный углы модели будут находиться в обстановке растяжения и деформация здесь будет реализовываться за счет увеличения объема блоков. Это подтверждает распределение коэффициента Лоде–Надаи и нулевые максимальные касательные напряжения в

указанных областях. Распределение касательных напряжений указывает также на активность разломов практически всех направлений, но в пределах зоны влияния нагружения. Рассмотрение коэффициента Лоде–Надаи позволяет ранжировать выделенные системы разломов на два типа: в разломах СВ-ЮЗ простирается наблюдается относительное объемное сжатие, а в разломах СЗ-ЮВ простирается наблюдается обстановка растяжения. Учитывая то, что “условный” коэффициент Лоде–Надаи показывает в разломах СВ-ЮЗ простирается тип тензора напряжений в виде трехосного сдвига-сжатия, можно интерпретировать полученную картину следующим образом: по СВ-ЮЗ разломам происходит сдвиг, а обстановка растяжения в разломах СЗ-ЮВ простирается приводит к их активизации. Анализ сравнения ориентировок осей главных напряжений с механизмами напряженного состояния в районе СРП, определенными по структурно-геоморфологическому методу, не показал удовлетворительного соответствия.

Нагрузка *варианта В* прикладывалась в условиях невозможности горизонтальных перемещений на вертикальных границах нагружаемых бло-



ков. Такой режим приводит к более выраженному перемещению нагруженных клиньев в вертикальном направлении, о чем свидетельствуют повышенные амплитуды перемещений вблизи вертикальных (в плоскости листа) боковых границ. При этом минимальные перемещения локализовались в области ССВ-ЮЮЗ простираения с двумя ярко выраженными минимумами симметрично диагональному разлому СВ-ЮЗ направления. Параллельные ему разломы в основном имеют тип тензора напряжений в виде трехосного сдвига-сжатия, в то время как тензор сдвига с компонентой одноосного растяжения присутствует в ортогональной им системе разломов СЗ-ЮВ простираения. Таким образом, можно заключить, что по сравнению с предыдущим вариантом нагрузки, в данной ситуации активизируется система СЗ-ЮВ разломов при сдвигании по основным разломам СВ-ЮЗ простираения. Несмотря на качественно верную картину кинематики разломов, сопоставление рассчитанных ориентировок осей главных напряжений с реконструированными по структурно-геоморфологическому методу не дало хорошего соответствия: при совпадении в локальных областях, где определялась обстановка растяжения, отклонения в ориентировках в большинстве случаев составили около 40 градусов.

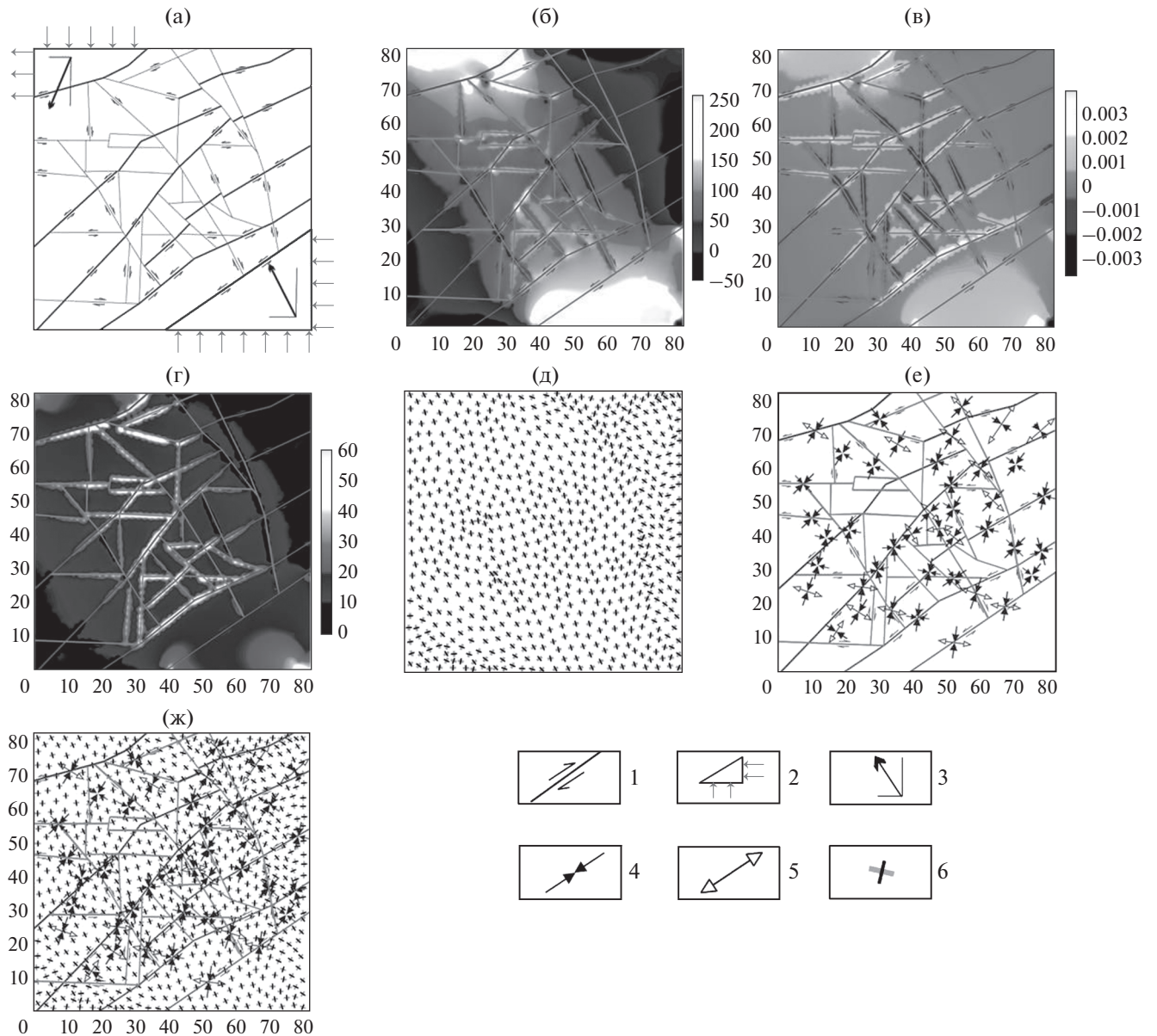
Вариант *нагрузки С* воссоздает боковой подпор перемещающимся Северо-Хинганским ТБ в предположении отсутствия горизонтальных перемещений к северо-западу от зоны разломов вдоль р. Аргунь. Воздействие давящего блока вызывает основные перемещения в восточной части моделируемой области, формируя растягивающие деформации в разломах СЗ-ЮВ и субмеридионального простираения (вдоль направления приложения нагрузки). Очевидно, что упор, образуемый неподвижным блоком со стороны Кличкинского разлома, обуславливает появление области повышенных давлений и приводит к сжатию в разломах субширотной ориентировки. Несмотря на это, в указанных разломах возникают значимые по интенсивности касательные напряжения, что приводит к реализации в них тензора напряжений в виде трехосного сдвига-сжатия. Совпадения в ориентировках осей главных напряжений наблюдаются, так же как и в предыдущем случае, в областях локального растяжения. Следует отметить приуроченность хороших совпадений к основным разломам СВ-ЮЗ простираения. В других областях ориентировки максимальных сжимающих напряжений различаются на углы ~45 градусов.

В варианте *D* было замечено, что при нагрузке, задаваемой за один шаг, наименьшие по амплитуде смещения наблюдаются в центральной части модели, а траектории перемещений как бы растекаются в стороны от этой “стабильной” области. При этом для всех разломов СВ-ЮЗ простираения

наблюдаются повышенные значения максимальных касательных напряжений, что говорит об их активизации. Также активизированы субширотные разломы. Распределения касательных напряжений в целом хорошо соотносятся с распределением для максимальных сдвиговых деформаций, что может свидетельствовать о преобладании сдвигов по указанным разломам. Интересным представляется анализ разломов СЗ-ЮВ простираения по параметрам давления, достигающим значений максимальных касательных напряжений и объемной упругопластической деформации: при слабых касательных напряжениях и пониженном по сравнению с вмещающей областью давлении здесь наблюдаются отрицательные деформации объема. Это свидетельствует о наличии обстановки растяжения в СЗ-ЮВ разломах. Сопоставление параметра Лоде–Надаи и расчетных ориентировок осей главных напряжений с ориентировкой неотектонических напряжений показывает их существенное несоответствие, даже несмотря на качественное воспроизведенную активность системы разломов СВ-ЮЗ простираения.

В варианте *нагрузки D1* угловые блоки “движутся” не по ограничивающим разломам, а в диагональных направлениях, указанных на фиг. 8. Об этом свидетельствуют максимальные уровни амплитуд смещений. Распределение давления позволяет отметить, что его повышенные уровни связаны с заданием краевых условий. В диагональной полосе СЗ-ЮВ направления отражается воздействие такого типа сдавливания при малых давлениях в юго-западной и северо-восточной областях модели.

Очевидно, что при продлении структур модели в СВ и ЮЗ направлениях область формирования напряжений будет шире, а области пониженных давлений в оговоренных областях можно вывести за границы рассматриваемой структуры. Распределение касательных напряжений указывает на активность разломов практически всех направлений, но в пределах зоны влияния нагружения. Рассмотрение объемных деформаций (фиг. 8в) позволяет установить кинематику разломов двух типов: в разломах СВ-ЮЗ и субширотного простираения наблюдается относительное объемное сжатие, а в разломах СЗ-ЮВ и субмеридионального простираения наблюдается обстановка растяжения. С учетом того, что коэффициент Лоде–Надаи показывает в разломах СВ-ЮЗ простираения тип тензора напряжений в виде трехосного сдвига-сжатия, можно интерпретировать полученную картину следующим образом: по СВ-ЮЗ разломам происходит сдвиг, а растяжение в СЗ-ЮВ разломах приводит к их активизации. Сопоставление ориентировок осей главных напряжений с проекциями ориентировок главных напряжений на дневную поверхность, рассчитанными с помощью структурно-геоморфологического метода, по-



**Фиг. 8.** Воздействия в 2D-модели, заданные краевыми условиями варианта нагружения D1: моделирование несоосного регионального сжатия при вертикальном и горизонтальном давлении на боковые границы Северо-Хинганского тектонического блока в сочетании с вертикальным давлением и горизонтальным перемещением Газимурско-Кличкинского тектонического блока. (а) – схема нагружения; (б) – тектоническое давление (МПа); (в) – объемные деформации (относительные величины); (г) – максимальные касательные напряжения (МПа); (д) – карта траекторий главных нормальных напряжений (алгебраически максимального и минимального); (е) – сетка разломов с указанием кинематики разломных зон и ориентировок главных напряжений на неотектоническом этапе тектогенеза, установленных с помощью структурно-геоморфологического метода; (ж) – результирующая картина от совмещения моделей (д и е). 1 – основные разломы и направления смещения их крыльев; 2 – направления воздействия на блоки модели; 3 – результирующее направление перемещений блоков; 4 – оси главных напряжений сжатия, определенные по результатам анализа поля тектонических напряжений по структурно-геоморфологическому методу; 5 – оси главных напряжений растяжения, определенные по результатам анализа поля тектонических напряжений по структурно-геоморфологическому методу; 6 – оси главных максимальных (сжимающих; черные отрезки) и минимальных напряжений (серые отрезки) сжатия или растяжения.

казывает хорошее соответствие. Некоторые несоответствия могут быть связаны с тем, что в двумерной постановке априори полагается, что алгебраически среднее напряжение направлено

вертикально к плоскости модели, а алгебраически минимальное главное напряжение полагается растягивающим, в то время как в структурно-геоморфологическом методе фактически присут-

ствуют все три компоненты тензора главных напряжений.

Сравнение распределения амплитуд перемещений в *варианте нагрузки E* с ранее проанализированными показало, что область с наименьшими перемещениями дневной поверхности вытянулась в СВ-ЮЗ направлении. Это позволяет говорить о возможности возникновения обстановок растяжения в областях с минимальными амплитудами горизонтальных перемещений. Распределения максимальных касательных напряжений, так же как и в варианте D1, свидетельствуют об активизации разломов СВ-ЮЗ простирания. Объемные деформации также позволяют предположить наличие раздвижения в разломах СЗ-ЮВ простирания. Сравнение расчетных проекций главных напряжений на горизонтальную плоскость также дает удовлетворительное соответствие. Отмечается хорошее совпадение областей с обстановками растяжения отмеченных выше областей. Основные отклонения в ориентировках наблюдаются в областях, в которых было дешифрировано трехосное напряженное состояние. Соответствие по данному параметру для варианта нагрузки E несколько хуже, чем приведенное для варианта нагрузки D1.

Во всех рассмотренных выше вариантах отсутствие дополнительного бокового подпора на вертикальных (в плоскости листа) границах приводит к тому, что в юго-западном и северо-восточном углах модели наблюдается недостаток давления. С одной стороны, это приводит к появлению обстановки растяжения в указанных областях и формированию тензора напряжений в виде трехосного сдвига-сжатия в разломах СВ-ЮЗ простирания. С другой стороны, происходит "растекание вещества" через свободные границы. В частности, такая ситуация постоянно наблюдается в северо-восточной части модели.

Для того чтобы преодолеть указанное обстоятельство, в серии *нагрузок F1* при задании нагрузки на северной границе предполагалось, что границей "давящего" тектонического блока является субширотный Кличкинский разлом (см. фиг. 6).

Для нагрузки *варианта F* в северо-восточной части модели наблюдаются максимальные давления и максимальные значения касательных напряжений в разломных зонах. Если сопоставить распределения максимальных касательных напряжений и коэффициента Лодэ-Надаи, можно заметить, что в центральной части модели устанавливается обстановка сжатия. При этом здесь достигаются минимальные значения касательных напряжений. Сравнение ориентировок осей главных напряжений показывает неудовлетворительное соответствие.

Если противоположные блоки, на которые прикладывается нагрузка, испытывают одинаковые встречные перемещения (*вариант нагрузки F1*), то области повышенных и пониженных давлений разделяются разломом СЗ-ЮВ простирания в центральной части модели. При этом в области повышенных давлений значения, наблюдаемые в СЗ-ЮВ разломах, отрицательные, что приводит к их раскрытию. В них также отмечаются отрицательные значения объемной деформации. Для данного расчета сопоставление ориентировок главных осей напряжений также не дало удовлетворительных результатов.

В *варианте нагрузки F3* повышенные давления в северо-западной части модели аналогичны предыдущим двум случаям и обусловлены воздействием Северо-Хинганского блока, к которому прикладывается нагрузка со значительной меридиональной составляющей. Распределение коэффициента Лодэ-Надаи мало отличается от варианта F. При этом повышенные значения максимальных касательных напряжений наблюдаются практически во всех системах разломов, кроме наиболее крупных разломов СЗ-ЮВ простирания. Отметим, что сопоставление ориентировок осей главных напряжений с характерными обстановками локальных напряженных состояний дает в целом хорошее соответствие. Расхождение по последнему критерию наблюдается лишь в северо-западной части модели и составляет ~-45 градусов.

*Вариант нагрузки F5* дает ожидаемые распределения давлений и коэффициентов Лодэ-Надаи: в северо-западной части модели (Газимурско-Кличкинский ТБ) наблюдается обстановка растяжения при недостатке давлений (слабоотрицательные значения до 30 МПа) и наиболее низкие значения сдвиговых деформаций. Однако в целом совпадение в ориентировках главных осей напряжений крайне слабое. Отличия от механизмов сжатия по геолого-тектоническим данным составляют от -60 до -40 градусов.

Таким образом, анализ десяти вариантов нагружения в рамках двумерного моделирования показывает следующее. Для обеспечения обстановки левого сдвига по разлому, проходящему вдоль долины реки Аргунь, при задании нагрузки на расположенный в юго-восточном углу модели Северо-Хинганский ТБ необходимо, чтобы воздействие было сжимающим и имело положительную СВ-ЮЗ компоненту вдоль простирания разлома. Газимурско-Кличкинский ТБ, расположенный в северо-западном углу модели, целесообразно ограничить по субширотному Кличкинскому разлому. Это позволяет реализовать отпор от указанной границы, что при наличии сжимающего воздействия с южной компонентой приводит к формированию области влияния нагружения, охватывающей

значительную часть модели. Учитывая, что система разломов СЗ-ЮВ простирается является наиболее “молодой”, можно ожидать в указанных разломах реализации обстановки сдвига, либо сдвига-раздвига (транстенсии). Такая ситуация наблюдается в вариантах нагружения С, D, D1, F3 и F5 в отличие от системы более “древних” разломов СВ-ЮЗ, субширотного и субмеридионального направлений.

Наилучшее соответствие ориентировок проекций осей главных напряжений результатам определения характера напряженного состояния структурно-геологическим методом установлено для вариантов нагружения С, D1 и F3. В этих вариантах осевое сжатие было преобладающим, что подтвердило изначальную гипотезу о ведущей роли данного механизма нагружения. Тем не менее, в отличие от варианта нагружения D, где направление осевого сжатия имело некоторую северо-западную составляющую, в указанных трех вариантах реализовывалась возможность “выдавливания” материала к западу (влево в плоскости модели).

Обстановка горизонтального растяжения, определенная структурно-геоморфологическим методом в северо-восточной части модели и наблюдаемая в вариантах нагружения С, D, D1 и F5, может отвечать “раскрытию” межгорной впадины Сухой Урулюнгуй. При этом варианты D и F5 показали весьма слабое соответствие по критерию сходимости с результатами определения характера напряженного состояния структурно-геологическим методом. В варианте F3, показавшем наибольшее совпадение с этим критерием, условий для растяжения во впадине не идентифицировано. Для системы разломов СВ-ЮЗ простирается в указанных вариантах практически везде хорошо проявлена обстановка сдвига или сдвига-сжатия (транспрессии). В вариантах С, D и F3 разломы субширотного простираются (например, Кличкинский) обладают похожей активностью. Отметим также, что определения обстановки растяжения в северо-восточной части модели в целом хорошо согласуются с расчетными ориентировками главных напряжений варианта нагружения D1. При этом следует учесть, что ряд определений (Петров и др., 2010), полученных с помощью структурно-геоморфологического метода, может быть связан с реализацией сдвиговых смещений на разломах близмеридионального простираются, а другая часть, которая находится в хорошем соответствии с расчетными данными, соответствует разломам более низкого ранга и может быть соотнесена с тектоническим напряжением внутри блоков.

Для создания корректной модели эволюции нагружения необходима представительная информация о палеоперемещениях и изменении регионального поля напряжений за геологическое

время (например, начиная с палеозоя). Указанные параметры можно получить из анализа борозд скольжения методом катакластического анализа трещин (Ребецкий, 2011) или методом стрейн-анализа (Войтенко, 2000, 2008).

В результате исследований было установлено, что для реализации бокового отпора на северной и западной границах модели целесообразно задавать краевые условия, препятствующие “растеканию” вещества. При задании нагружения на северной и южной границах модели необходимо учитывать возможность “выдавливания” материала в западном направлении, что обеспечивает обстановку растяжения в северо-восточной части моделируемой территории (в северо-восточной части впадины Сухой Урулюнгуй). Данные предложения были реализованы в тектонических нагрузках трехмерной модели.

#### *Результаты трехмерного моделирования*

Следующим этапом геолого-структурного анализа и геодинамического моделирования геологических структур района Стрельцовского урановорудного поля являлось построение трехмерной модели напряженно-деформированного состояния массивов пород. Учитывая допущение, принятое в соответствии с фиг. 5, трехмерная модель была построена на основе параметров геоматериалов (табл. 1) и каркаса разломной тектоники (фиг. 6), для которого была построена сетка конечных элементов (фиг. 7).

Перепады в рельефе местности учитывались следующим образом: для центральной (впадина Сухой Урулюнгуй), юго-восточной (долина р. Аргунь) и северо-западной (Западно-Урулюнгуйская впадина) частей модели были заданы высоты дневной поверхности 500 м над условным уровнем моря (нулевым уровнем). Глубже (до нулевой отметки) развиты толщи осадочно-вулканогенных пород. Остальные высоты полагались равными 1 км и соотносились с массивами гранитоидов, для которых наличие маломощных горизонтов осадочно-вулканогенных пород не учитывалось.

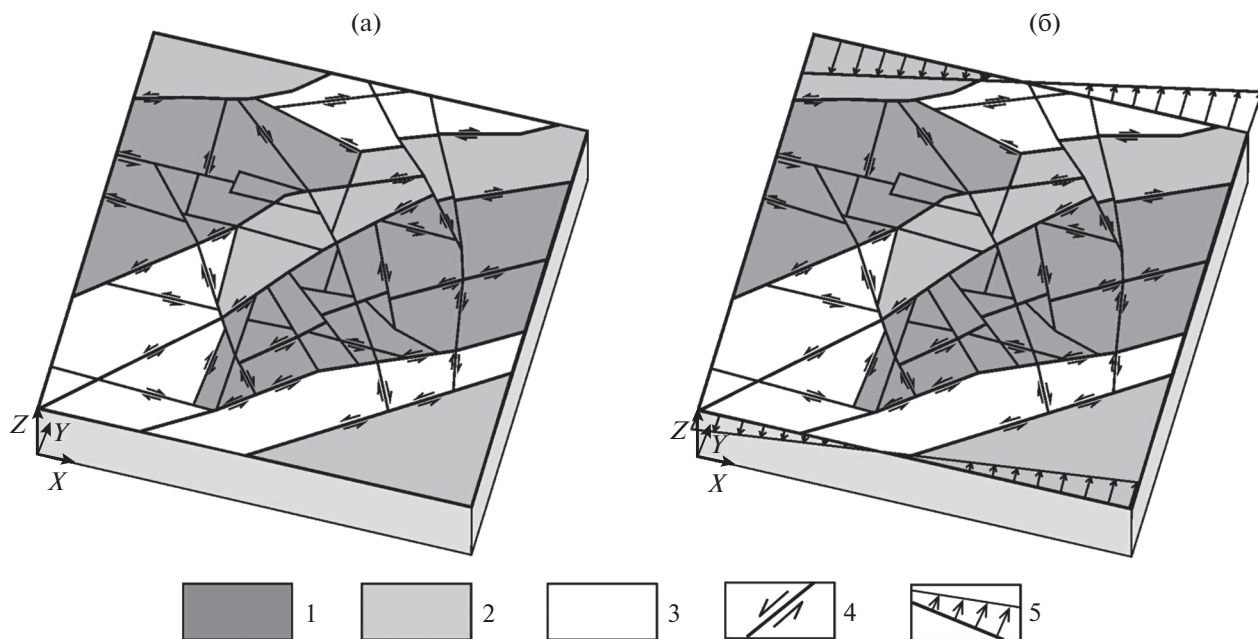
Схемы нагружения показаны на фиг. 9. В качестве начальных закреплений использовались следующие условия:

на нижней плоскости, ограничивающей модель (глубина 15 км), все узлы фиксированы (нет перемещений и поворотов);

на боковых границах допускается перемещение по вертикальной оси ( $Z$ );

по осям  $X$  и  $Y$ , расположенным в горизонтальной плоскости, перемещения полагаются нулевыми;

верхняя поверхность свободна от закреплений.



**Фиг. 9.** Основные схемы нагружения для 3D-модели напряженно-деформированного состояния пород района Стрельцовского рудного поля: (а) – учитывает начальное гравитационное напряженное состояние и дополнительный подъем гранитоидных масс, (б) – учитывает нагрузку, создаваемую горизонтальными тектоническими силами, приводящими к растяжению в центральной части модели. 1 – области, для которых задавалось вертикальное поднятие поверхности; 2 – области с высотами 500 м; 3 – области с высотами 1000 м; 4 – разломы и направления перемещений их крыльев; 5 – направления горизонтальных перемещений в моделируемом объеме.

Реализация 3D-модели нагружения осуществлялась следующим образом:

на первом этапе формировалось гравитационное напряженно-деформированное состояние;

на втором этапе путем приложения вертикальной нагрузки в перемещениях моделировалось поднятие поверхности (области горных сооружений на фиг. 9);

на третьем этапе задавалось смещение боковых поверхностей.

Трехмерное геодинамическое моделирование проведено для нагрузки под собственным весом. Под “собственным весом” понимается формирование начального напряженного состояния под влиянием силы тяжести. Учитывая сжимаемость геоматериалов и критериальную возможность перехода областей в пластическое течение, на данном шаге происходит накопление внутренних повреждений, деформаций и напряжений за счет особенностей внутреннего строения при отсутствии внешних сил.

Для моделирования влияния восходящих движений в областях горных сооружений (фиг. 9а) внутри проекции их границы на нижнюю горизонтальную плоскость задавались вертикальные перемещения амплитудой 60 м, что приблизительно соответствовало проседаниям дневной поверхности в этих областях при формировании модели начального напряженного состояния под воздействием

собственного веса горных пород, рассчитанной на предыдущем шаге нагружения.

Амплитуды горизонтальных перемещений соотносились как 2 : 1. Максимальная амплитуда перемещений на южной (нижней в плоскости рисунка) и на верхней (северной) границах составляли 100 и 200 м соответственно. Таким образом, в северо-восточной части модели создавалось относительное растяжение, а в западной части модели – относительное сжатие. На этапе приложения нагрузки на восточной и западной границах “разрешались” перемещения в направлении север-юг (по оси  $Y$ ).

Нагрузки прикладывались за один шаг.

Для сравнения была рассчитана задача (фиг. 9б) без учета поднятия горных областей, сложенных гранитоидами. Таким образом, в восточной и центральной частях модели создавалось относительное растяжение (имитация раскрытия впадины Сухой Урулюнгуй), а в западной части модели относительное сжатие.

При проведении трехмерного моделирования анализировалось шестнадцать различных вариантов сочетания параметров и процессов (табл. 3). Пример моделирования (вариант 4) приведен на фиг. 10.

Анализ распределения давлений по глубине при рассмотрении задачи влияния гравитационных сил на формирование начального гравита-

**Таблица 3.** Параметры и процессы, анализировавшиеся при 3D-моделировании

Вариант	Краткая характеристика и моделируемый процесс
1	Собственный вес: распределение давлений по глубине, в МПа
2	Собственный вес: распределение максимальных касательных напряжений по глубине, в МПа
3	Собственный вес: распределение амплитуд перемещений, в метрах
4	Собственный вес: интенсивность максимальных главных упруго-пластических деформаций, безразмерный
5	Собственный вес и поднятие (без сдвига): распределение давлений, в МПа
6	Собственный вес и поднятие (без сдвига): распределение максимальных касательных напряжений, в МПа
7	Собственный вес и поднятие (без сдвига): распределение магнитуды перемещений, в метрах
8	Собственный вес и поднятие (без сдвига): распределение магнитуды максимальных упруго-пластических деформаций, безразмерный
9	Собственный вес, поднятие и сдвиг: распределение давлений, в МПа
10	Собственный вес, поднятие и сдвиг: распределение максимальных касательных напряжений, в МПа
11	Собственный вес, поднятие и сдвиг: распределение магнитуды перемещений, в метрах
12	Собственный вес, поднятие и сдвиг: распределение магнитуды максимальных упруго-пластических деформаций, безразмерный
13	Собственный вес и сдвиг (без поднятия): распределение изотропных давлений, в МПа
14	Собственный вес и сдвиг (без поднятия): распределение максимальных касательных напряжений, в МПа
15	Собственный вес и сдвиг (без поднятия): распределение амплитуд перемещений, в метрах
16	Собственный вес и сдвиг (без поднятия): распределение амплитуд интенсивностей сдвиговых упруго-пластических деформаций, безразмерный

ционного состояния показывает, что на дневной поверхности наблюдаются локальные области недостатка всестороннего давления, которые полностью исчезают уже на условном уровне моря. Они сменяются областями минимальных сжимающих давлений, разделяясь связанными областями относительного повышения (до 40 МПа) давлений. Напомним, что неоднородности рельефа при моделировании учитывались таким образом, что представляли собой локальные превышения типа плато, в которых на 500 м углублены центральная впадина (впадина Сухой Урулюнгуй), западная часть Газимурско-Кличкинского ТБ и Южно-Аргунская впадина (долина р. Аргунь).

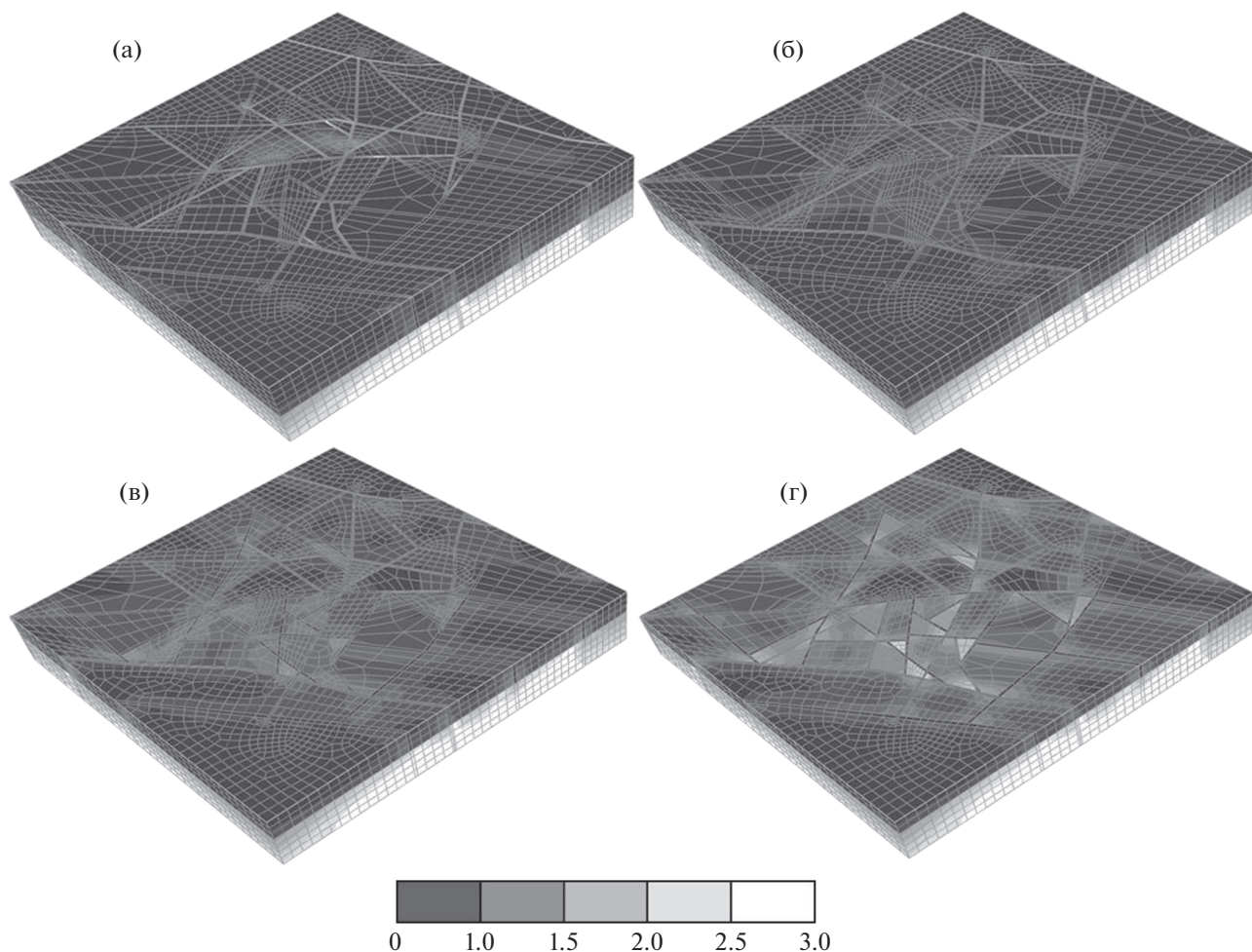
Распределения давлений показывают, что центральная впадина характеризуется фоновым уровнем давлений вплоть до глубин 2 км. Далее до глубин 5 км уровень наблюдаемых давлений в ней ниже на ~20 МПа, чем во вмещающей гранитоидной раме. Далее на всех анализируемых уровнях область центральной впадины никак не проявлена в поле давлений. Отметим, что в целом давления монотонно растут с глубиной ввиду заданной повышенной несжимаемости модельных геоматериалов разломных зон. Это, возможно, означает следующее:

в данной ситуации, ввиду отсутствия существенных латеральных градиентов давления, можно определить, что в целом значения распределений этого параметра близки к литостатическому;

заниженные значения давлений в центральной впадине модели можно трактовать как результат дополнительного выжимания впадины под действием изостатической компенсации, которая вызвана перераспределением масс из-за дополнительного нагружения от положительных форм рельефа;

неоднородности в распределении давлений здесь проявляются на верхних горизонтах рассматриваемой структуры, потом они выражены слабее и к глубинам 2–3 км возникает относительно однородное поле давлений.

Распределение касательных напряжений в моделях показывает, что данный параметр плавно нарастает с глубиной от нулевых значений на поверхности до ~120 МПа на глубине 7 км. Следует заметить, что выраженная в градиенте касательных напряжений центральная впадина четко проявляется на двух глубинных уровнях. Она слабо выражена на уровне дневной поверхности, но четко маркируется на абсолютной нулевой отметке. Далее она практически не выражена вплоть до глубин в 3 км и далее уменьшается, сменяясь зонами локализации повышенных значений максимальных касательных напряжений вдоль разломов и внутри мелких блоков, что очевидно свидетельствует о возрастании значимости сдвиговых процессов в формировании общего напряженно-деформированного состояния пород. Таким образом, выше уровня 3 км (условно) деформации в основном порождаются объемным сжатием, либо



**Фиг. 10.** Расчетная интенсивность (от 0 до 3) максимальных главных упруго-пластических деформаций (табл. 3, вариант 4) на разных глубинах геологического разреза: (а) 0 км, (б) –2 км, (в) –4 км, (г) –6 км. Условия нагружения определены собственным весом пород.

растяжением, в то время как на более глубинных горизонтах в перераспределении напряжений в основном участвуют сдвиговые механизмы.

Несмотря на то что по амплитудам перемещений трудно судить о характере процессов, которыми они сопровождаются, тем не менее, отметим следующее. Поскольку наша модель построена таким образом, что гранитоидный комплекс подстилается структурным (модельным) слоем с пониженной сжимаемостью и повышенной текучестью, то можно констатировать, что основной вклад в амплитуды перемещений будут вносить вертикальные просадки. Действительно, они максимальны в областях превышений рельефа. Как обсуждалось ранее, гравитационный эффект от горных сооружений в данном случае выше, что приводит к большему объемному сжатию здесь и повышенной нагрузке на нижележащие струк-

турные слои. Необходимо также отметить образование локальной области в восточной части модели (район п. Досатуй). Она прослеживается от поверхности до глубин 7 км, формируя конусообразную структуру. Амплитуды перемещений в центральной впадине показывают одинаковые значения в диапазоне глубин от дневной поверхности вплоть до 5 км. Отсутствие динамики здесь, очевидно, связано с влиянием бокового подпора, возникающего под воздействием аномалий силы тяжести, формируемых горными поднятиями в области развития гранитоидных пород.

Анализ распределения интенсивностей максимальных главных упруго-пластических деформаций показывает, что в верхних горизонтах наибольшие значения внутри тектонических блоков достигаются в осадочном чехле области центральной впадины. Это, вероятно, обусловлено исходно

заданной низкой прочностью осадочных и вулканогенно-осадочных пород, которые претерпевают выжимающее воздействие, дополнительное к обстановке преобладающего вертикального сжатия под действием силы тяжести. Глубже 1 км ниже уровня моря повышенные значения этого параметра приобретают зональный характер. Область их проявления охватывает центральную часть модели, включая юго-западное окончание впадины Сухой Урулюнгуи и район Стрельцовой кальдеры. Ниже глубины 3 км наблюдается тяготение максимальных упруго-пластических деформаций к разломам СВ-ЮЗ простирания. Максимальные значения на данной глубине отмечаются в небольших блоках, ограниченных системой СЗ-ЮВ разломов. Такая картина хорошо наследуется распределением для глубины 5 км. При этом ярче проявляется дифференциация повышенных деформаций в малых блоках. Это наблюдается и на глубине 7 км, причем локализации максимально достигаемых здесь значений наблюдаются в областях примыкания разломов, которые сходятся под острыми углами. Необходимо отметить, что под впадиной Сухой Урулюнгуи наблюдаются наименьшие значения деформаций, а повышенным уровнем деформаций характеризуется линейная зона вдоль Кличкинского разлома.

Формирование дополнительного поднятия гранитоидных комплексов приводит к тому, что на глубине более 1 км давление в поднятиях и юго-западной части впадины выравнивается. При этом область максимальных упруго-пластических деформаций локализуется под гранитоидным комплексом, примыкающим к долине реки Аргунь. Наличие значимых упруго-пластических деформаций оконтуривает также Газимиро-Кличкинский тектонический блок и разломы меридионального простирания западнее впадины Сухой Урулюнгуи, трассируясь также в верхних горизонтах в ее юго-восточной части.

Анализ влияния тектонического сдвига на следующем шаге нагружения показывает, что в оговоренной выше модели формируется значительное растяжение в северо-восточной части, ограничиваясь магистральным разрывным нарушением север-северо-западного простирания. Дополнительное давление со стороны западной части Газимиро-Кличкинского тектонического блока, вероятно, значительно компенсируется сдвигом вдоль ограничивающих его разрывных нарушений восток-юго-восточного простирания и близлежащих меридионально ориентированных разломов. При этом наименьшие значения максимальных касательных напряжений соответствуют скоплению мелких блоков в гранитоидном комплексе южнее впадины Сухой Урулюнгуи. Распределение максимальных упруго-пластических деформаций, кроме перечисленных особенностей, также говорит об активизации разломов северо-восточного прости-

рания. Представляется, что эти разломы, оконтуривающие гранитные комплексы и впадины, могли сформироваться на этапе воздымания интрузивных масс. В результате этого в центральной части исследуемой области могла сформироваться структура эшелонированных сбросов северо-восточного простирания, а также секущие сбросовые и взбросовые структуры субмеридионального простирания, рассмотренные в работе (Петров и др., 2010). Реализация предложенной схемы нагружения также подтверждается характером смещений, наблюдаемых с помощью GPS, указывающих на раскрытие впадины Сухой Урулюнгуи.

Решение, полученное без учета вертикального подъема гранитоидных массивов на этапе формирования начального напряженного состояния, но с учетом предложенного механизма тектонических воздействий, обнаруживает похожее влияние на восточную часть модели. Но здесь это приводит к активизации сдвиговых перемещений вдоль близмеридиональных разломов и тенденции к закрытию берегов впадины Сухой Урулюнгуи.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В геологическом прошлом наиболее крупные и уникальные месторождения полезных ископаемых, в том числе стратегических видов минерального сырья (золото, уран, редкие металлы и др.), формировались в активизированных структурах подвижных поясов на границах стабильных литосферных блоков (Фундаментальные..., 2012). В настоящее время эти рудоносные зоны характеризуются повышенной тектонической нарушенностью и сейсмической активностью (Экстремальные..., 2011).

На обрабатываемых месторождениях в условиях постепенного смещения фронта добычных работ на глубокие горизонты наряду с геодинамическими процессами активизируются проявления горного давления. Их сочетание нередко приводит к горно-тектоническим ударам (техногенным землетрясениям) большой разрушительной силы (Адушкин, Турунтаев, 2005; Курленя и др., 2005 и др.). В России и мире зарегистрированы десятки таких явлений: рудники Ловозерского редкометального месторождения, рудники Таштагольского железорудного месторождения, Североуральские бокситовые рудники (Каталог..., 1989), серебро-свинец-цинковое месторождение Локкерби в Канаде (Urbancic, Trifu, 1998) и т.д. В результате горнорудные предприятия вынуждены останавливать работы, порой на длительное время. В условиях, когда горнорудное предприятие является градообразующим, это приводит к негативным социально-экономическим последствиям.

За последние десятилетия организация сетей мониторинга тектонических проявлений и де-



формаций блоков литосферы стала одним из важнейших инструментов в решении фундаментальных научных и прикладных задач, имеющих особое значение для народного хозяйства и обеспечения безопасности страны. Примером является созданная в конце 20 века система станций наблюдения за сейсмотектоническими процессами “Байкальского геодинамического полигона”, охватывающего Южное Прибайкалье, Восточные Саяны, Туву, Центральную и Западную Монголию (Саньков и др., 2005; Лухнев и др., 2010). Результаты исследований на этой территории во многом способствовали принятию решения об изменении маршрута нефтепровода “Восточная Сибирь–Тихий Океан” в сторону от Байкальской рифтовой системы, в пределах которой интенсивно проявлена современная сейсмотектоническая активность.

Тем не менее, на прилегающих с юго-востока к Байкальскому рифту обширных территориях Юго-Восточного Забайкалья подобная система наблюдений за развитием современных геодинамических и сейсмотектонических процессов отсутствует. Об этом свидетельствуют материалы проекта World Stress Map – глобальной ГИС, которая в настоящее время объединяет по всему миру около 22000 точек постоянных и временных наблюдений за деформациями литосферы (Reinecker *et al.*, 2005).

Наряду с этим на территории Юго-Восточного Забайкалья размещены крупнейшие рудные узлы и поля месторождений, которые исторически являются основными поставщиками таких стратегических видов минерального сырья, как золото, уран, редкие и редкоземельные металлы (Бортников и др., 2012). Дальнейшие перспективы добычи полезных ископаемых в Забайкалье связаны со следующими факторами:

распространением фронта добычных работ на глубокие горизонты обрабатываемых месторождений на фоне усложнения горно-геологических условий;

вводом в строй новых крупных месторождений, для которых горно-геологические условия обработки руд не определены.

Для обеспечения работ по освоению минеральных ресурсов необходимо на единой геоинформационной платформе провести оценку геодинамической и сейсмической обстановок, осуществить трехмерное моделирование геолого-тектонического строения и развития современных сейсмогеодинамических процессов, а также разработать инфраструктуру сетей мониторинга сдвижений земной поверхности и сейсмотектонических событий в литосфере горнорудных территорий. Последующая организация и ввод в строй этих сетей должны обеспечить повышение эффективности планирования и осуществления мероприятий в области рационального недропользования и эко-

логической безопасности действующих и намечаемых к строительству горнорудных комплексов.

В контексте создания геоинформационной платформы необходимо:

систематизировать информацию о пространственно-временной неоднородности поля напряжений, динамике формирования элементов разломной тектоники и механизмах генерации напряжений в литосферных блоках;

организовать работу с базами геоданных и картографическими материалами (топографические, геологические, тектонические, рудно-формационные, гидрогеологические и другие карты) в единой системе координат;

создать трехмерные геоинформационные модели геолого-тектонического строения территории и развития сейсмогеодинамических процессов в отдельных блоках земной коры с выделением сейсмически активных участков и разломных зон;

разработать ГИС-проекты геодинамического полигона с размещением в его пределах пунктов мониторинга сдвижений земной поверхности и сейсмогеодинамических процессов с учетом геолого-тектонического строения территории, перспектив развития ее минерально-сырьевой базы и социально-экономического потенциала.

По результатам анализа пространственно-временных закономерностей развития сейсмогеодинамических процессов и напряженно-деформированного состояния массивов пород должны быть разработаны концептуальные и числовые модели различных масштабов (региональный, субрегиональный, локальный), проведена верификация результатов моделирования по данным полевых наблюдений, сейсмоакустических, сейсмодеформационных и иных методов получения информации *in situ* о НДС пород, сформулированы предложения по размещению пунктов мониторинга природно-техногенных процессов.

Именно такая последовательность мероприятий реализуется в районе ПАО “ППГХО” (г. Краснокаменск), осуществляющего добычу и переработку урановых руд уникальных по запасам месторождений Стрельцовского рудного поля.

Наряду с этим представленная в статье методология разработки трехмерной интегрированной модели напряженно-деформированного состояния геологической среды может быть использована для прогноза рудоносности глубоких горизонтов и флангов месторождений. Эта оценка осуществляется с помощью ретроспективного анализа, основанного на реконструкции тектонодинамических условий формирования рудовмещающих структур месторождений, палеотектонического состояния массивов пород с учетом их реологии и динамики проявления флюидогенерирующих физико-химических процессов. В сочетании с современными структурно-геологическими, струк-

турно-петрофизическими и тектонофизическими методами, включая количественный расчет напряжений и деформаций (Петров и др., 2015), появляется возможность установить пути миграции и определить условия концентрации полезных компонентов в зоне рудоотложения.

## ВЫВОДЫ

Основные результаты исследований в районе производственной деятельности ПАО «ППГХО» — крупнейшего в стране комплекса по добыче и переработке урановых руд, сводятся к следующему. Выполнен геолого-структурный анализ и геодинамическое моделирование геологических структур района Стрельцовского рудного поля на основе впервые разработанных схем: разломной тектоники по данным геолого-структурного, минералого-петрографического и петрофизического картирования основных разломных зон; распространения сейсмодислокаций по данным их картирования и структурно-геоморфологического анализа территории; распределения сеймотектонических режимов (стресс-тензоров) по данным структурно-кинематического анализа разломных зон. Все материалы сведены в единый трехмерный ГИС-проект на платформе ArcGis 10 с модулем ArcGIS 3D-Analyst.

Впервые в районе Стрельцовского рудного поля методом GPS-геодезии на пунктах постоянных и временных наблюдений проведены измерения скоростей и направлений современных горизонтальных движений. Определены средний механизм землетрясений и ориентировка осей действующих в районе главных напряжений сжатия и растяжения.

На основе геоструктурных, геофизических, геотектонических, петрофизических и других данных созданы модели строения, свойств и реологических связей геологической среды, определены граничные условия для числового тектонофизического моделирования методом конечных элементов. Разработаны 2D- и 3D-модели напряженно-деформированного состояния массивов пород по комплексу данных о современных напряжениях и сеймотектонических деформациях поверхности с выделением активных разломов. Впервые в нашей практике расчетные геодинамические модели интегрированы в трехмерную ГИС.

Результаты моделирования верифицированы на региональном и локальном масштабных уровнях. На региональном уровне подтверждение получено при детальном (включая проходку шурфов) изучении Кличкинской сейсмодислокации — разломной зоны, для которой установлена активность с середины плиоцена до наших дней (~5 млн лет). На локальном уровне результаты моделирования подтверждаются данными многолетнего дефор-

мационного и сейсмоакустического мониторинга высоконапряженного массива горных пород эксплуатируемого молибден-уранового месторождения Антей. Хорошая сходимость результатов геодинамического моделирования и наблюдений *in situ* позволяет предлагать продолжение комплексного изучения палеотектоники и современного напряженно-деформированного состояния массивов пород, с концентрацией исследований во внутрикальдерной части Стрельцовского рудного поля.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят А.В. Пономарева, Ю.О. Кузьмина, Е.А. Рогожина и Л.А. Сим (ИФЗ РАН, Москва), А.В. Парфеевца и А.В. Лухнева (ИЗК СО РАН, Иркутск), А.Н. Власова и Д.Б. Волкова-Белгородского (ИПРИМ РАН) за консультации и помощь при постановке задач и проведении пространственно-временного анализа геодинамических процессов, сейсмичности, смещений поверхности, полей напряжений и деформаций, а также Б.А. Просекина и С.И. Шукина (ПАО «ППГХО», Краснокаменск) за многолетнее плодотворное сотрудничество и помощь в решении затронутых в статье вопросов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы 1.4П фундаментальных исследований Президиума РАН, Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-05-01369\_а) и Российского научного фонда (соглашение № 16-17-00018).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева О.В., Головин В.А., Козлова П.С. и др.* Эволюция мезозойского магматизма и рудно-метасоматических процессов в юго-восточном Забайкалье (Россия) // Геология руд. месторождений. 1996. Т. 38. № 2. С. 115–130.
- Адушкин В.В., Турунтаев С.Б.* Техногенные процессы в земной коре. М.: ИНЭК, 2005. 252 с.
- Борняков С.А.* Моделирование сдвиговых зон на упруговязких моделях // Геология и геофизика. 1980. № 11. С. 75–84.
- Борняков С.А.* Физическое моделирование процессов разломообразования в литосфере на современном этапе: обзор // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. В 2-х томах. Т. 1. М.: ИФЗ РАН, 2012. С. 50–56.
- Бортников Н.С., Петров В.А., Веселовский А.В. и др.* Геоинформационная система (ГИС) забайкальского сектора Монголо-Охотского подвижного пояса // Руды и металлы. 2012. № 3. С. 18–27.
- Вольфсон Ф.И., Ищукова Л.П., Вишняков В.Е. и др.* Условия локализации гидротермального уранового оруденения в слоистых толщах верхнего структурного этажа // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1967. № 11. С. 114–134.

- Войтенко В.Н.* Корреляция параметров конечной деформации и анизотропии магнитной восприимчивости: сравнение результатов исследования метатурбидитов северо-западного Приладожья // *Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле*. Т. 1. М.: Изд. ИФЗ РАН, 2008. С. 22–25.
- Войтенко В.Н.* Модель формирования складок в центральной части Таласского Алатау по данным микроструктурного и стрейн-анализа // *Вестник СПбГУ*. 2000. Сер. 7. Вып. 4. № 31. С. 78–84.
- Войтенко В.Н., Погорелов В.В., Якубовская А.О., Гонегер А.В.* Моделирование поля тектонических напряжений и деформаций с учетом эволюционного формирования геоструктур (на примере Сайлагского массива, Восточный Саян) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2013. № 4. С. 419–433.
- Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
- Геологическое строение Читинской области. Объяснительная записка к геологической карте масштаба 1 : 500 000 / Отв. ред. Рутштейн И.Г., Чабан Н.Н. / Чита: ГГУП “Читагеолсъемка”, 1997. 239 с.
- Гинтов О.Б.* Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры. Киев: Феникс, 2005. 572 с.
- Долгих Г.И.* Исследование волновых полей океана и литосферы лазерно-интерференционными методами. Владивосток: Дальнаука, 2000. 157 с.
- Духовский А.А., Амантов В.А., Артамонова Н.А. и др.* Сейсмические и гравитационные образы ведущих рудных районов и полей юго-восточного Приаргуны (Восточное Забайкалье, Россия) // *Геология руд. месторождений*. 1998. Т. 40. № 2. С. 99–113.
- Жиров Д.В., Сим Л.А., Маринин А.В.* Реконструкция палеостресс-состояний в южной части Хибинского плутона (восток Фенноскандинавского щита) // *Актуальные проблемы динамической геологии при исследовании платформенных областей*. М.: Изд-во МГУ, 2016. С. 39–44.
- Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудниках и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склоновых и опасных по горным ударам (РД 06-329-99). М.: ГП НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. 66 с.
- Ищукова Л.П., Модников И.С., Сычѳв И.В. и др.* Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. Иркутск: ГК “Геологоразведка”, 2007. 260 с.
- Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях (Североуральское, Таштагольское, Октябрьское (Норильск), Юкспорское, Кукисвумчорское (ПО “Апатит”), Кочкарское и другие месторождения. Л.: ВНИМИ, 1989. 182 с.
- Комплексные геодинамические полигоны: методика и результаты исследований / Отв. ред. Буланже Ю.Д., Лилиенберг Д.А. М.: Наука, 1984. 143 с.
- Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97). М.: ИФЗ РАН, 1999.
- Кочкин Б.Т., Петров В.А.* Долгосрочный прогноз сейсмической опасности в связи с проблемой изоляции радиоактивных отходов // *Геология и геофизика*. 2015. Т. 56. № 7. С. 1369–1380.
- Кузьмин Ю.О.* Тектонофизика и современная геодинамика // *Физика Земли*. 2009. № 11. С. 44–60.
- Кузьмин Ю.О., Жуков В.С.* Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Изд-во МГУ. 2004. 262 с.
- Курленя М.В., Серяков В.М., Еременко А.А.* Техногенные геомеханические поля напряжений. Новосибирск: Наука, 2005. 264 с.
- Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И. и др.* Вращения и деформации Земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 7. С. 1006–1017.
- Михайлова А.В.* Методические вопросы создания и исследования тектонических моделей с применением пластичных эквивалентных материалов // *Экспериментальная тектоника: методы, результаты, перспективы*. М.: Наука, 1989. С. 209–227.
- Никонов А.И.* Тектонофизические аспекты структурного дешифрирования линеamentных систем // *Современная тектонофизика: методы и результаты*. В 2-х томах. Т. 2. М.: ИФЗ РАН, 2011. С. 78–93.
- Осокина Д.Н.* Пластичные и упругие низко-модульные оптически-активные материалы для исследования напряжений в земной коре методом моделирования. М.: АН СССР, 1963. 196 с.
- Палеосейсмология. В 2-х томах / Ред. Мак-Калпин Дж.П. М.: Научный мир, 2011. 560 с.
- Петров В.А.* Тектонофизические условия формирования ВТС Восточно-Забайкальской урановорудной провинции. М.: ИГЕМ РАН–ВИМС, 2007. С. 140–144.
- Петров В.А., Сим Л.А., Насимов Р.М., Шукин С.И.* Разломная тектоника и неотектонические напряжения в районе Стрельцовской кальдеры, ЮВ Забайкалье // *Геология руд. месторождений*. 2010. Т. 52. № 4. С. 310–320.
- Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В.* Влияние петрофизических свойств и деформаций пород на вертикальную зональность метасоматов в ураноносных вулканических структурах (на примере Стрельцовской кальдеры, Забайкалье) // *Геология руд. месторождений*. 2014. Т. 56. № 2. С. 95–117.
- Петров В.А., Ребецкий Ю.Л., Полуэктов В.В., Бурмистров А.А.* Тектонофизика гидротермального рудообразования: пример молибден-уранового месторождения Антей, Забайкалье // *Геология руд. месторождений*. 2015. Т. 57. № 4. С. 327–350.
- Погорелов В.В., Конешов В.Н., Ребецкий Ю.Л.* Численное моделирование напряжений западного фланга Зондской субдукционной области // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2010. № 1. Вып. 15. С. 174–192.
- Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Петров В.А., Просекин Б.А.* Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождениях Антей // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012. № 3. С. 3–13.
- Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Петров В.А. и др.* Современное напряженно-деформированное состояние верхних уровней земной коры Амурской литосферной плиты // *Физика Земли*. 2014. № 3. С. 104–113.
- Ребецкий Ю.Л.* Обзор методов реконструкции тектонических напряжений и сеймотектонических деформаций // *Тектонофизика сегодня*. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 227–243.

- Ребецкий Ю.Л.* Методики тектонофизической реконструкции напряжений и деформаций в природных массивах по данным геологических и сейсмологических индикаторов // Современная тектонофизика: Методы и результаты. В 2-х томах. Т. 2. М.: ИФЗ РАН, 2011. С. 109–146.
- Ребецкий Ю.Л.* Об особенностях напряженного состояния коры внутриконтинентальных орогенов // Геодинамика и тектонофизика. 2015. № 4. С. 437–466.
- Ребецкий Ю.Л., Лермонтова Е.С.* О дальнедействующем влиянии областей аномального напряженного состояния для среды в закритическом состоянии // Активные разломы и их значение для оценки сейсмической опасности: современное состояние проблемы. Воронеж: Научная Книга, 2014. С. 331–337.
- Ребецкий Ю.Л., Кузиков С.И.* Тектонофизическое районирование активных разломов Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2016. № 6. С. 1225–1250.
- Романюк Т.В., Власов А.Н., Мнушкин М.Г. и др.* Реологическая модель и особенности напряженно-деформированного состояния региона активной сдвиговой разломной зоны на примере разлома Сан-Андреас. Статья 1. Разлом Сан-Андреас как тектонофизическая структура // МОИП. Отд. геол. 2013. Т. 88. Вып. 1. С. 3–19.
- Рыбалов Б.Л.* Пространственное размещение позднемезозойских рудных месторождений в Восточном Забайкалье (Россия) // Геология руд. месторождений. 2002. Т. 44. № 4. С. 354–368.
- Саньков В.А., Леви К.Г., Кале Э. и др.* Современные и голоценовые горизонтальные движения на Байкальском геодинамическом полигоне // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 3. С. 422–430.
- Саньков В.А., Леви К.Г., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И.* Современные движения литосферных блоков Центральной Азии по данным GPS-геодезии // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии. Под ред. Леви К.Г. и Шермана С.И. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 165–179.
- Семинский К. Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В. и др.* Межблоковые зоны в земной коре юга Восточной Сибири: тектонофизическая интерпретация геолого-геофизических данных // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 3. С. 203–278.
- Сим Л.А.* Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1991. № 10. С. 3–22.
- Сим Л.А.* Применение полевых методов реконструкции тектонических напряжений по данным о разрывах для решения теоретических и практических задач // Современная тектонофизика: Методы и результаты. В 2-х томах. Т. 2. М.: ИФЗ РАН, 2011. С. 156–171.
- Сим Л.А.* Краткий обзор состояния изученности палеотектонических напряжений и их значение для решения геодинамических задач // Геодинамика и тектонофизика. 2013. № 4. С. 341–361.
- Соловьев Н.С., Шатков Г.А., Якобсон Л.Н. и др.* Приаргунско-Монгольский вулканический пояс // Геология и геофизика. 1977. № 3. С. 20–31.
- Стефанов Ю.П.* Численное моделирование процессов деформации и разрушения геологических сред. Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск: 2008. 30 с.
- Фундаментальные основы формирования ресурсной базы стратегического сырья (Au, Ag, Pt, Cu, редкие элементы и металлы) // Отв. ред. Бортников Н.С. М.: ГЕОС, 2012. 340 с.
- Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ). НП-064-05. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2005.
- Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Имаев В.С.* Палеосейсмодислокации в зоне Кличкинского надвига (Юго-Восточное Забайкалье) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41. № 2. С. 22–36.
- Шерман С.И.* Естественные триггерные механизмы нарушения метастабильного состояния разломно-блоковой среды литосферы в реальном времени // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. № 5. С. 33–48.
- Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной тектонофизике / ред. Луцицкий И.В., Бондаренко П.М. М.: Наука, 1985. 304 с.
- Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 2: Геология урана, геоэкология, гляциология / Отв. ред. Глико А.О. М.: ИФЗ РАН, 2011. 431 с.
- Юнга С.Л.* Методы и результаты изучения сейсмостектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 190 с.
- Ben-Zion Y.* Properties of seismic fault zone waves and their utility for imaging low-velocity structures // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 12567–12585.
- Ben-Zion Y., Sammis C.G.* Characterization of fault zones // Pure Appl. Geophys. 2003. V. 160. P. 677–715.
- Chester J., Chester F.M., Kronenberg A.K.* Fracture energy of the Punchbowl fault, San Andreas system // Nature. 2005. V. 437. P. 133–136.
- Delvaux D., Moyes R., Stapel G. et al.* Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part I: Palaeozoic and Mesozoic prerift evolution // Tectonophysics. 1995. V. 252. P. 61–101.
- Delvaux D., Moyes R., Stapel G. et al.* Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part II: Cenozoic rifting // Tectonophysics. 1997. V. 282. P. 1–38.
- Lesne O., Calais E., Deverchere J.* Finite element modeling of crustal deformation in the Baikal rift zone: new insights into the active-passive debate // Tectonophysics. 1998. V. 289. P. 327–430.
- Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Kuchay O.A., Tatevossian R.E.* Development of inversion methods on fault slip data. Stress state in orogenes of the central Asia // Tectonophysics. 2012. Vol. 581. P. 114–131.
- Reinecker J., Heidbach O., Tingay M. et al.* The 2005 release of the World Stress Map. URL: [www.world-stress-map.org](http://www.world-stress-map.org)
- Vlasov A.N., Yanovskiy Yu.G., Mnushkin M.G., Popov A.A.* Solving geomechanical problems with UWay FEM package // Computational Methods in Engineering and Science (ed. Iu V.P.), Taylor and Francis, 2004. P. 453–461.
- Urbancic T.I., Trifu C.-I.* Shear zone stress release heterogeneity associated with two mining-induced events of M 1.7 and 2.2 // Tectonophysics. 1998. № 289. P. 75–89.