

УДК 550.34

СОВРЕМЕННАЯ АКТИВНАЯ ТЕКТОНИКА ФЕРГАНСКОЙ ВПАДИНЫ (УЗБЕКИСТАН) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ КОРОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

© 2022 г. И. У. Атабеков¹, *, Ю. М. Садыков¹, Р. С. Ибрагимов¹

¹Институт сейсмологии им. Г. Мавлянова, Академия наук Республики Узбекистан,
ул. Зулфияханум, д. 3, 100028 Ташкент, Узбекистан

*e-mail: atabekovi@mail.ru

Поступила в редакцию 21.07.2022 г.

После доработки 19.08.2022 г.

Принята к публикации 02.09.2022 г.

Сеймотектонический процесс в Ферганской впадине обусловлен неотектонической активизацией земной коры. Этот процесс способствуют поддержанию высокого сейсмического потенциала региона, о чем свидетельствуют прошедшие здесь с древних времен по настоящее время разрушительные землетрясения и сохранившиеся следы палеосейсмодислокации. Сильные землетрясения генетически связаны с участками интенсивных движений в новейшее и современное время, с зонами активных разрывных нарушений земной коры. Они участвуют в формировании неотектонической и современной структуры и рельефа Ферганской впадины. При тектоническом районировании используются инструментальные данные, полученные при измерении скоростей движения геологических структур. При этом считается, что характер движения определяет критические напряжения, превышение которых приводят к возникновению землетрясений. В то же время результаты моделирования напряженного состояния земной коры дают сложную картину, вычленение из которой главного направления сил не всегда удается. Более того, различные методы моделирования напряженно-деформированного состояния земной коры дают неполностью взаимно совпадающие результаты. В данной статье мы сопоставляем напряженное состояние земной коры и скорости перемещений, полученные методом численного решения уравнений равновесия сплошных сред с реконструированными напряжениями по механизмам очага землетрясений для Ферганской впадины.

Ключевые слова: неотектоника, современные тектонические движения, математическая модель, напряжения земной коры, Ферганская впадина, Западный Тянь-Шань

DOI: 10.31857/S0016853X22050034

ВВЕДЕНИЕ

Для оценки сейсмической опасности регионов важное место занимает комплексное исследование и разработка геолого-геофизических и численных моделей локальных очаговых зон сильных землетрясений. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования особенностей взаимосвязи и взаимообусловленности приповерхностного и глубинного строения верхней (гранитной) части земной коры и сейсмичности. Промежуточным звеном в этих исследованиях могут служить выяснение напряженно-деформированного состояния приповерхностных частей гранитного слоя земной коры. В этой связи наблюдается заметное увеличение исследований, посвященных реконструкций напряженного состояния земной коры по механизмам очагов землетрясений для всего мира, и, в частности, — для

отдельных регионов Центральной Азии [7, 20, 23, 26, 28, 29]. Также делается попытка изучения напряженного состояния земной коры с помощью численного моделирования [2, 3, 22]. Тектоническое течение и расслоение литосферы сопровождаются пластическими деформациями [12]. В работе [2] было проведено моделирование пластического течения горных масс в литосфере Центральной Азии на основе уравнений гидромеханики ползущих движений (задача Стокса) и с учетом особенностей современного рельефа Земли. Эти уравнения в свою очередь используют тектонические напряжения земной коры Центральной Азии, полученные из решения обратной задачи с частично неизвестными граничными условиями [22]. При этом Евразийская плита считалась неподвижной, граничные напряжения на остальных границах устанавливались числен-

ным экспериментом. Для начальной итерации граничные напряжения принимались пропорционально скоростям Индийской и Аравийской плит.

В качестве граничных условий для задачи Стокса были использованы тектонические напряжения Центральной Азии, реконструированные вычислительным экспериментом [22]. Были построены векторные поля скоростей перемещений земной коры Западного Тянь-Шаня [3]. В качестве граничных условий использовались внутренние напряжения, найденные из более общей задачи, а именно, — о напряженном состоянии Центральной Азии, где Ферганская впадина была одной из 19 блоков, и скорости перемещений вдоль Таласо-Ферганского разлома по данным GPS [2]. Были приняты в расчет рельеф поверхности Ферганской впадины и граница Мохо, а также два активных глубинных разлома: Северо-Ферганский и Южно-Ферганский. В данной статье мы попытаемся провести совместный анализ результатов численного моделирования напряженного состояния Ферганской впадины, полученные в [3], и реконструированных напряжений по механизмам очагов землетрясений [7, 26]. По результатам этих работ можно сделать заключение, что сейсмодектонические движения на исследуемой территории, происходят в поле действующих субмеридионально и субгоризонтально ориентированных тектонических напряжений сжатия, что не противоречит большинству геодинамических построений. Однако ценность подобных построений определяется близостью результатов тектоническим инструментальным измерениям, а также возможностью применения их геотектоническому районированию. Но эти схемы сложно использовать для сейсмодектонического анализа, например, для исследования напряженного состояния современных тектонических структур или сейсмически активных разрывных нарушений разного ранга. Для достижения отмеченной цели, на наш взгляд, является упрощение графических приложений в работах [7, 26] и проведение сопоставительного анализа современных движений земной коры Ферганской впадины, полученные численным методом [3].

АКТИВНАЯ ТЕКТОНИКА ФЕРГАНСКОЙ ВПАДИНЫ

Превалирующим мнением причиной новейших структур Ферганской впадины является субгоризонтальное сжатие, обусловленное коллизией Индийской, Аравийской и Евразийской тектонических плит. Хотя, также имеются объяснения этих структур гравитационной неустойчивостью [1], и по характеру смещений по разлому [21, 25, 27]. Обычно геологи и геофизики делят Ферганскую впадину на Южный борт, Центральный грабен и Северный борт [18, 19].

В пределах Северного и Южного бортов выделяются ступенчатые зоны, которые, в свою очередь, делятся на антиклинальные, синклиналильные и моноклиналильные. Центральный грабен простирается с северо-востока на юго-запад и представляет практически равнину, местами холмистую, широко развитыми песчаными возвышенностями, а также болотистые участки, указывающие на территории испытывающие современное опускание.

По геолого-геофизическим данным [9, 10, 13, 14, 17, 24] и материалам глубокого бурения картируются три стратиграфических комплекса пород (сверху вниз): мезо-кайнозойский, палеозойский и допалеозойский. Первые два из них стратифицированы, в допалеозойском комплексе выделяются блоки, различающиеся по плотностным характеристикам. По поверхности допалеозойских отложений южный борт имеет вид моноклинали, которую можно разделить на три части. Две крайние части более крутые. Надо заметить, что не все границы сопровождаются разломами. Иногда структуры выделяются на основе морфологической выраженности. Большинство разломов имеют северо-восточное простирание.

Сложную картину представляет поверхность домезозойских пород. Более дробное расчленение имеют Северный и Южный борта впадины. Резко выделяется Южный борт, имеющий дислоцированный характер, разбитый большим количеством разрывных нарушений. Южный блок отличается от Северного блока дифференцированностью и интенсивностью тектонических движений, сформировавших домезозойскую поверхность. Площадь северного борта в два раза больше, в то время как имеется всего шесть морфоструктур. Площадь южного борта два раза меньше, имеется 13 структур.

Для данной поверхности отсутствует группировка разломов в одном направлении, как это можно видеть на поверхности кристаллического фундамента. Но в тоже время наиболее значимые структуро-контролирующие разломы имеют северо-восточные ориентации. Схожий рисунок представляет структура мезо-кайнозойского чехла.

Современная структура осадочного (MZ-KZ) покрова расчленена на ряд структурно-тектонических элементов. Главные из которых — Северная ступень, Центральный грабен, Южный переходный пояс и Южная ступень. В отличии исследуемых поверхностей домезозойского и кристаллического фундамента, в данную схему введен новый элемент, а именно — Южный переходный пояс, свидетельствующий о более сложном геологическом строении зоны сочленения Южной ступени и Центрального грабена, пространственно совпадающая с Южно-Ферганской флексуно-разрывной зоной (ФРЗ) [6].

Полоса северо-восточного простирания, включающая Южный переходной пояс и Южную ступень, наиболее дифференцированная зона данной территории. Характер деформирования палеозойского фундамента отражается и в особенностях залегания неотектонических структур, которые представлены складчатыми и складчато-блоковыми дислокациями [4, 5].

Неотектонические структуры в основном, линейно-вытянутые брахиантиклинальные складки, представляющие продолжение крупных антиклинальных ответвлений Ферганского поднятия. Некоторые из них отличаются сложным строением, смещением сводов, несогласным залеганием пластов и размывами. Складки располагаются почти кулисообразно и создают эшелонированные ряды, которые с юга и севера ступенчато погружаются к центру Ферганской впадины. Здесь эти структуры имеют пологие крылья, а борта осложнены разрывными нарушениями.

В течение юрского, мелового и палеогенового периодов складчатые движения проявлялись сравнительно слабо. Основные фазы складкообразования проявились в этапе интенсивных неотектонических движений. К этому времени относится формирование сводовых поднятий на периферии и зарождение более мелких складок внутри впадины. При проявлении дифференцированных движений, разломы фундамента возрождались, и в мезозойско-кайнозойском прокоре образовались крупные Южно-Ферганская и Северо-Ферганская ФРЗ, способствовавшие широкому развитию надразломных складок.

По генетическим и кинематическим признакам все структуры Ферганской впадины объединены в антиклинальные и синклиналильные зоны. Южно-Ферганская зона складок располагается в предгорно-адырной полосе Туркестано-Алайской горной системы. Ее северной границей служит Южно-Ферганская флексурно-разрывная зона, по которой она граничит с Ферганской мегасинклиналью, а южной границей, контуры палеозойского обрамления, протягивающиеся вдоль северных склонов Туркестанского хребта. Контакт между мезо-кайнозойем и палеозоем проходить по Южно-Ферганскому разлому.

К западу от Таласо-Ферганского сдвига на фоне меридионального сжатия формируются субширотные взбросо-сдвиговые зоны южного горного обрамления. Борты впадины частично перекрыты надвинутыми на нее палеозойскими породами горного обрамления. Развитые региональные разломы (Таласо-Ферганский, Северо- и Южно-Ферганский, Северо- и Южно-Ферганский ФРЗ) определяют современный структурный план Ферганской впадины и ее горного обрамления, характеризующееся сочетанием транспрессии (сдвиго-сжатие) и транстенсии (сдвиго-растяжение). К их

зонам приурочены сильные землетрясения и палеосейсмодислокации.

Особое положение занимают Северо-Ферганская и Южно-Ферганская ФРЗ. Они, располагаясь в теле Ферганской впадины, представляют собой сочетание изгибовых и разрывных дислокаций. Упомянутые региональные разломы активно функционировали в палеозойский, мезозойско-кайнозойский и неотектонический этапы развития. О современной активности этих разломов и флексурно-разрывных зон свидетельствуют многочисленные сильные землетрясения. Анализ скоростей новейших тектонических движений на основе изучения изменения палеорельефа, показывает, что в раннем плейстоцене средняя вертикальная скорость для Восточной Ферганы была 0.51 мм/год, а в среднем плейстоцене возросла до 0.8 мм/год. Некоторое уменьшение в позднем плейстоцене до 0.59 мм/год. В настоящее время эта тенденция продолжается [11].

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Активную тектонику можно ранжировать в зависимости от характера смещений по разлому, которое основано на наличие трех основных типов между складками и разрывами: взброс, сброс и сдвиг [21, 25, 27]. Они характеризуются отношениями главных напряжений (условно $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). Их значения и направления определяются по тензору напряжений σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) решением уравнений:

$$\det \|\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}\| = 0. \quad (1)$$

Уравнения (1) приводится к следующему виду:

$$\begin{aligned} \sigma^3 - I_1 \sigma^2 + I_2 \sigma - I_3 &= 0, \\ I_1 &= \sigma_{kk}, \quad I_2 = \sigma_{ij} \sigma_{ij}, \quad I_3 = \sigma_{ij} \sigma_{jk} \sigma_{ki}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для симметричного тензора напряжений уравнение (2) всегда имеет три действительные корня. Чтобы привязать средние напряжения к определенной глубине земной коры по результатам численного решения, предварительно был проведен анализ выделенной сейсмической энергии по глубинам за последние более 120 лет по известным сейсмологическим базам полученные из каталога сильных землетрясений на территории СССР, дополненной современными данными МЧС РУз, начиная с 1955 г. [15]. Согласно статистическому анализу преобладающая выделенная сейсмическая энергия соответствовала глубинам 14–17 км (рис. 1).

В нашем случае, из решения задачи [3], где описана полная постановка, мы получили горизонтальные средние напряжения σ_{11} , σ_{12} , σ_{22} для соответствующих глубин. На их основе по формуле (2) рассчитываем горизонтальное наибольшее

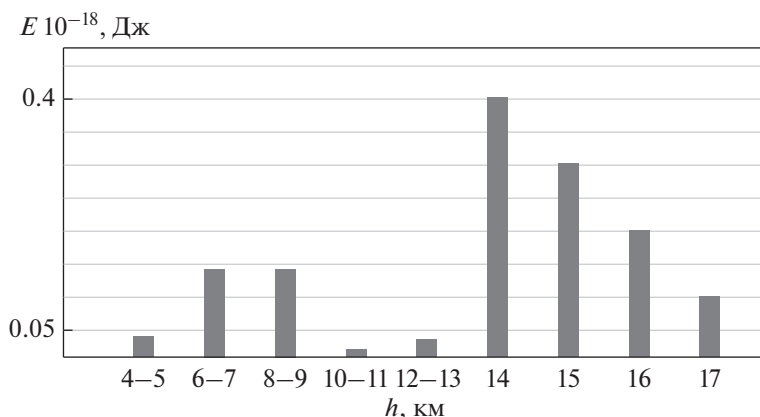


Рис. 1. Выделенная сейсмическая энергия (E) по глубине земной коры (h) Ферганской впадины за 1900–2022 гг.

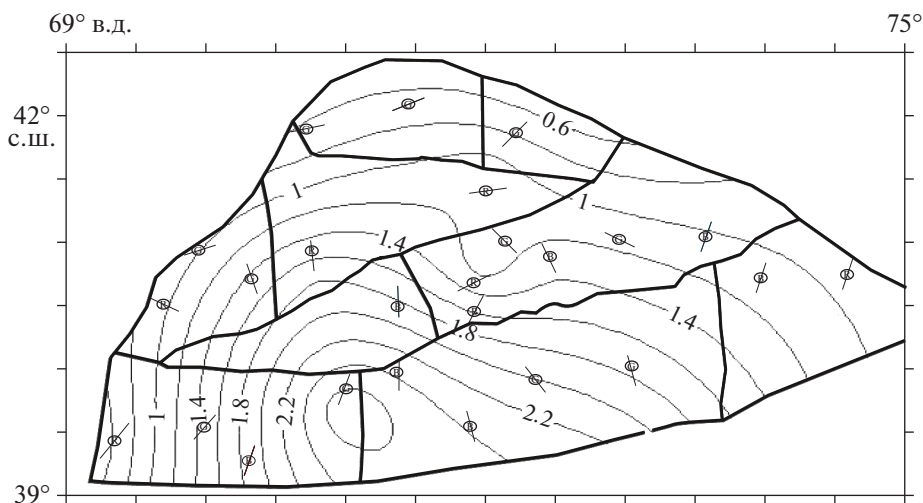


Рис. 2. Изолинии наибольших напряжений (кбар) и их направления (стрелки). По классификации Андерсона [21] указаны возможности осуществления взброса (R), сброса (B) и сдвига (G) при землетрясениях.

шее σ_1 , и наименьшее σ_2 напряжения и направление σ_1 (рис. 2). Для проведения геодинамического анализа к ним добавим вертикальное напряжение σ_{ver} , принятое как вес покрывающей породы. Анализ напряженного состояния земной коры по результатам численной модели проведем по методу Андерсона [21]. Отметим, что мы используем правило знаков напряжений, принятое в классической механике, т.е. считается, что сжимающие напряжения являются отрицательными, а растягивающие напряжения – положительными. Геодинамические типы напряженного состояния являются основой для составления карты районирования верхней упругой части литосферы. Согласно методу Андерсона, сравниваем отношение вертикального

напряжения σ_{ver} к горизонтальным наибольшим σ_1 и наименьшим σ_2 напряжениям.

При этом возникает следующее:

- преобладает вертикальное напряжение $\sigma_1 < \sigma_{ver}$, когда гравитация вызывает нормальные разломы, создавая горизонтальную деформацию растяжения;
- случай когда вертикальное напряжение σ_{ver} находится между наибольшим и наименьшим горизонтальным напряжением, при котором разница между двумя горизонтальными напряжениями создает сдвиговую деформацию;
- оба горизонтальные напряжения превышают вертикального напряжения $\sigma_3 > \sigma_{ver}$, при котором деформация сжатия компенсируются за счет надвига или взброса.

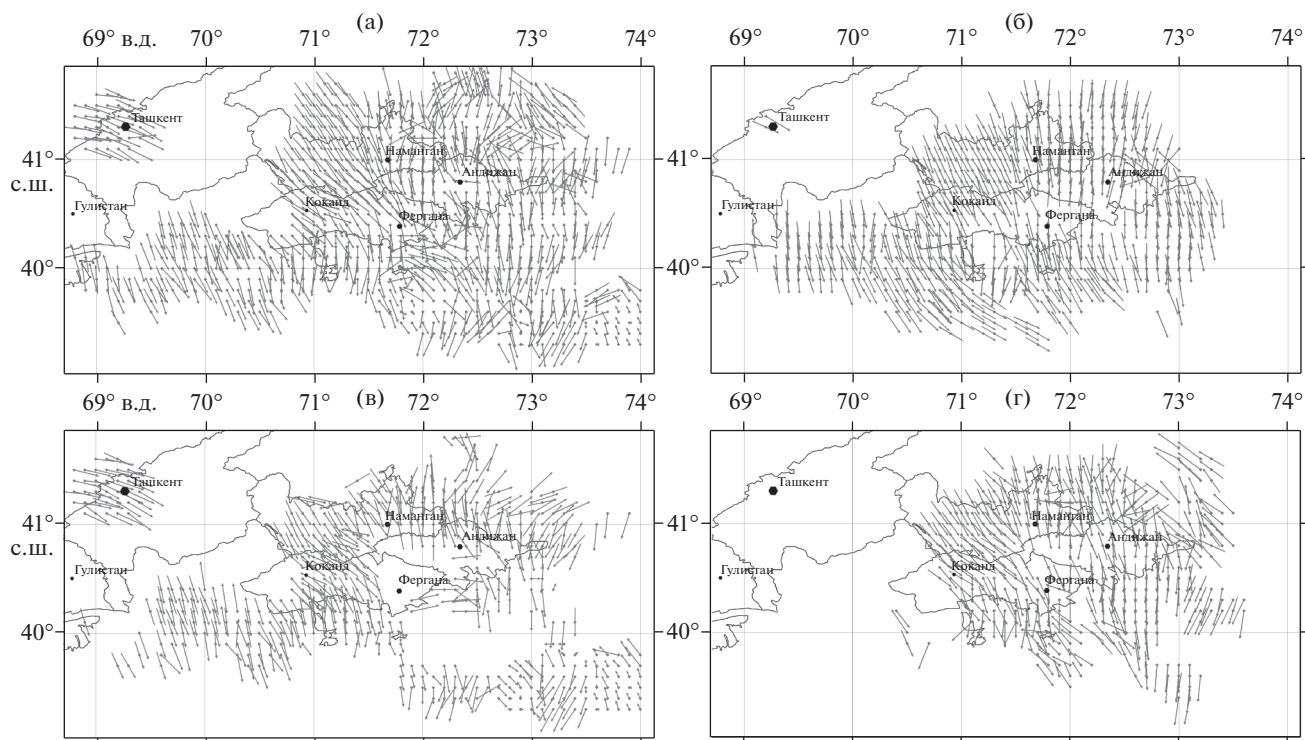


Рис. 3. Проекция на горизонтальную плоскость оси максимального сжатия (по данным [5]) при различных вариантах магнитуды M , и глубин h .

(а) – $M \leq 4.5$ и для всех глубин h ; (б) – $M > 5$ и для всех глубин h ; (в) – для всех M и $h \leq 10$; (г) – для всех M и $h \geq 11$.

Как следует из рис. 2, Центральная часть территории Ферганской впадины находится в состоянии растяжения, в которых геодинамически возможны осуществления нормальных сбросов (обозначены буквой В), а вдоль разломов – сдвиги (обозначены буквой G).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

С 1986 года в рамках проекта World Stress Map (WSM) коллективами ученых всего мира систематически составляются и дополняются карты ориентации максимального горизонтального напряжения [20, 28, 29]. Эти данные собираются из различных источников, в частности, из инструментальных данных, где это возможно, и по механизмам очагов землетрясений. Однако в этих построениях по Центральной Азии, приведены очень скудные данные. Тем не менее, сравнения геодинамических типов напряженных состояний, построенные нами по методу Андерсона, удовлетворительно совпадают с мировыми данными для рассматриваемого региона [29].

Детальная реконструкция напряжений земной коры Узбекистана по механизмам очагов землетрясений создана с помощью программы STRESS-

seism, разработанной в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН (г. Москва, Россия) [7, 16, 26].

Расчеты выполнены по сетке $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, при этом радиус круговой области, в пределах которой проведены осреднение параметров, составлял от 10 до 30 км. Минимальный размер однородной выборки в каждом исследуемом домене включал не менее шести определений механизмов, что достаточно для определения неизвестных в обратной задаче. С одной стороны, это несколько уменьшило площадь, на которой реконструкция оказалась возможной, с другой стороны, обеспечило высокую точность построений в областях, в которых реконструкцию осуществить удалось.

Исходя из распределения землетрясений по глубинам, отдельные построения проведены для всего сейсмоактивного слоя, верхней части земной коры (до $h = 10$ км) и слоя, расположенного ниже глубины $h = 10$ км. При полумagnitude классификации землетрясений по величине реконструкция осуществлялась отдельно по механизмам очагов слабых и умеренных землетрясений с магнитудой $M \leq 4.5$ и по сильным землетрясениям с магнитудой $M \geq 5.0$.

Согласно алгоритму метода катакластического анализа, для каждого домена сначала определяет-

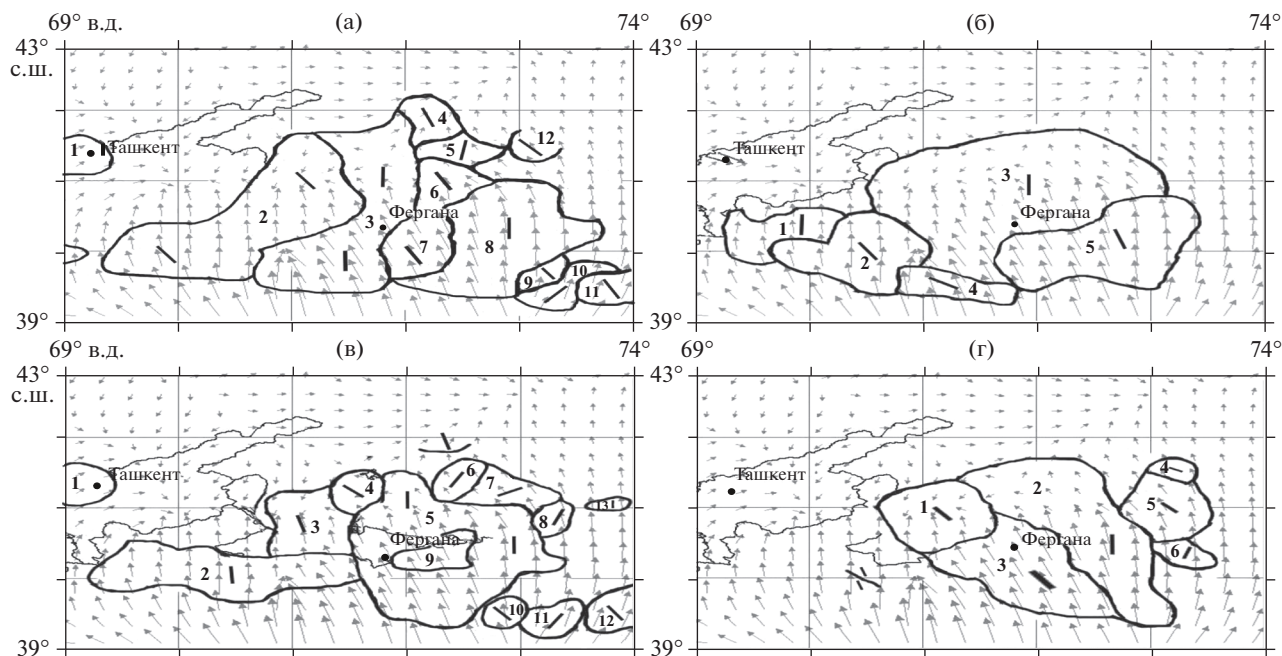


Рис. 4. Сопоставление участков однонаправленных осей максимального сжатия с направлениями векторов поля скоростей перемещений Западного Тянь-Шаня.

Выделение блоков соответствует вариантам:

- (а) – $M \leq 4.5$ и для всех глубин h ;
- (б) – $M > 5$ и для всех глубин h ;
- (в) – для всех M и $h \leq 10$;
- (г) – для всех M и $h \geq 11$.

ся азимуты и углы погружения осей главных напряжений. Они определяются на основе вариационного принципа о максимальной диссипации упругой энергии для реальных напряжений. Затем определяются значения коэффициента Лодде–Надаи и геодинамический тип напряженного земной коры.

Одновременно определяются относительные (нормированные на прочность сцепления горных пород) величины максимальных касательных напряжений. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных напряжений наибольшего сжатия при отборе землетрясений с различными магнитудами и гипоцентрами землетрясений с глубиной h сильно отличаются (рис. 3а–г). Это связано с изменением по глубине механизмов очагов землетрясений.

При этом в каждом случае ориентация сжимающих напряжений, находятся в удовлетворительном согласии с полем скоростей, полученным математическим моделированием. Несмотря на то, что численное моделирование проводится в среднем, физические параметры были выбраны с помощью верификации с данными GPS, а данные GPS на порядок отличаются от геодезических измерений [8], ошибки определения гипоцентров в базе сейсмологических данных доста-

точно велики, в особенности при глубине гипоцентров.

Обычно тектонические данные получают из инструментальных измерений перемещений, скоростей перемещений и на этом основании делается вывод о характере действующих напряжений. С целью проверки того, насколько такая практика правомерна, мы решили сопоставить поле скоростей перемещений с направлениями сжимающих сил в регионе исследования, хотя известно, что направления движения и направления действующих сил не всегда совпадает. Учитывая то обстоятельство, что исследуемый регион почти повсеместно находится в режиме горизонтального сжатия [7, 26] и, как мы полагаем, именно горизонтальное сжатие определяет направление движения блоков.

Для сопоставления сначала мы упростили направления, показанные на рис. 3, следующим образом: оси напряжений, имеющие близкие ориентации, объединялись в однородные участки. Направления напряжений, оконтуренные таким способом, сопоставим с полем скоростей полученные из численного эксперимента [3] (рис. 4а–г).

Сопоставление направлений осей наибольшего горизонтального сжатия с направлениями век-

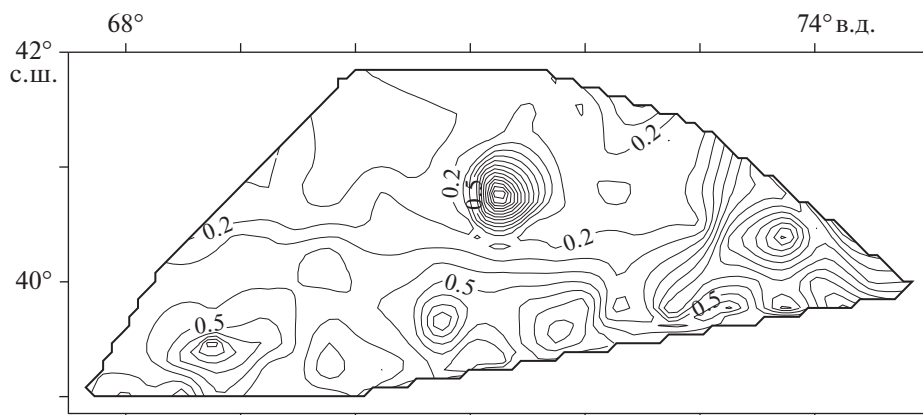


Рис. 5. Тангенциальные напряжения $\sigma_{\tau}/2 \times 10^8$ Па на глубине 15 км по результатам численной модели полученные с учетом динамической зоны влияния Южно-Ферганского разлома.

торов поля скоростей перемещений удовлетворительно (см. рис. 4).

В большинстве участков сходимость неполная и варьирует в пределах 10° – 30° . В верхних частях участков № 4 и № 5 направления скоростей перемещений резко не стыкуются с осями максимального сжатия (см. рис. 4, а). Имеется существенная разница в направлении векторов участка № 1 (см. рис. 4, б). Хорошая сопоставимость направлений векторов просматривается для участка № 2, № 3 и восточная часть № 5 (см. рис. 4, в). Существенные отклонения в сравниваемых параметрах наблюдается на участках № 6–№ 8 (см. рис. 4, в).

Сопоставимость нарушается только на участке № 4–№ 6, где наблюдается резкая нестыковка (см. рис. 4, г). Вероятно, данные нестыковки связаны с близостью зоны динамического влияния Таласо-Ферганского разлома. К сожалению, пока у нас нет ясного ответа, почему и каким образом Таласо-Ферганский разлом вносит влияющий фактор на результаты реконструкция механизмов землетрясений.

Сопоставление результатов геодинамической обстановки полученные двумя различными методами заставило нас провести дальнейшее усовершенствование численной модели. А именно, вместо Южно-Ферганского разлома ввели в модель узкую область, соответствующая динамическому влиянию этого разлома. В результате векторное поле скоростей изменилось незначительно, но направления наибольших и наименьших горизонтальных напряжений стало лучше сопоставимым с механизмами очагов землетрясений [3] (рис. 5).

Результаты проведенного нами численного моделирования предлагаются к применению, в комплексе с современными геолого-геофизическими, сейсмологическими данными и материалами спутниковой геодезии, а также инструмен-

тальными измерениями современных движений при сеймотектоническом анализе.

ВЫВОДЫ

1. На современном этапе тектонического развития Ферганской впадины, активными элементами являются унаследовано развивающиеся структуры Северного, Южного бортов и Центрального грабена, а также ограничивающие их региональные разломы.

2. Результаты численного моделирования горизонтальных скоростей перемещений лучше соответствуют инструментальным измерениям по сравнению с тектонофизическими реконструкциями напряжений, а именно – численно для территории Центрального грабена получено растяжение, но по тектонофизической реконструкции в принятом масштабе, вся территория Ферганской впадины сжата.

3. Результаты реконструкции напряженного состояния земной коры методами катакластического анализа разрывных смещений во многом определяются магнитудным диапазоном и глубиной гипоцентров рассматриваемых землетрясений, что свидетельствует о неоднородности напряженного состояния, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях.

Благодарности. Авторы благодарят анонимных рецензентов за полезные комментарии и редактора за тщательное редактирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурахматов К.Е., Аширов Б.М., Айтмырзаев Ж.С. Особенности новейшей тектоники Тянь-Шаня и Джунгарии // Вестн. ИС НАН КР. 2018. Т. 12. № 2. С. 8–14.
2. Атабеков И.У. Опыт моделирования сеймотектонического течения земной коры Центральной

- Азии // *Физика Земли*. 2021. № 1. С. 122–132. <https://doi.org/10.31857/s0002333721010014>
3. *Атабеков И.У., Садыков Ю.М.* Напряженное состояние земной коры Западного Тянь-Шаня в Центральной Азии (Узбекистан): Математическое моделирование // *Геотектоника*. 2022. № 3. С. 50–65. <https://doi.org/10.31857/S0016853X22030031>
 4. *Буртман В.С.* Тянь-Шань и Высокая Азия. Тектоника и геодинамика в палеозое. — Отв. ред. А.А. Моссаковский — М.: ГЕОС, 2006. 216 с.
 5. *Буртман В.С.* Тянь-Шань и Высокая Азия. Геодинамика в кайнозое. — Отв. ред. Ю.Г. Леонов — М.: ГЕОС, 2012. 188 с.
 6. *Зуннунов Ф.Х., Зильберштейн М.Б., Перельман И.И., Пак В.А., Пшеничная З.Д., Харитонов А.И., Грудкин К.А., Ефимов Г.П.* Глубинное геологическое строение Ферганской межгорной впадины и его изучение геофизическими методами. — Под ред. Т.Л. Бабаджанова — Ташкент: ФАН, 1973. 192 с.
 7. *Ибрагимова Т.Л., Ибрагимов Р.С., Мирзаев М.А., Ребецкий Ю.Л.* Современное напряженное состояние земной коры территории Узбекистана по данным сборного каталога механизмов очагов землетрясений // *Геодинамика и тектонофизика*. 2021. Т. 12. № 3. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0532>
 8. *Кузьмин Ю.О.* Парадоксы сопоставительного анализа измерений методами наземной и спутниковой геодезии в современной геодинамике // *Физика Земли*. 2017. № 6. С. 24–39. <https://doi.org/10.7868/S0002333717060023>
 9. *Леонов М.Г.* Структурные ансамбли Южного Тянь-Шаня и геодинамические условия их образования. — В сб.: *Тектоника орогенных сооружений Кавказа Средней Азии*. — Под ред. Н.П. Лаверова — М.: Наука, 1990. С. 72–100.
 10. *Леонов М.Г.* Альпийский этап в геодинамической эволюции Южного Тянь-Шаня. — В кн.: *Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия)*. — Под ред. Н.П. Лаверова — М.: Научный мир. 2005. С. 327–349.
 11. *Литосфера Памира и Тянь-Шаня*. — Отв. ред. И.А. Фузайлов, Р.А. Мусин — Ташкент: ФАН, 1982. С. 221–222.
 12. *Лукьянов А.В.* Пластические деформации и тектоническое течение в литосфере. — Под ред. А.Л. Книппера — М.: Наука: 1991. 144 с. (Тр. ГИН АН СССР; Вып. 460).
 13. *Мордвинцев Д.О.* Новые взгляды на глубинное геологическое строение Ферганской впадины по геофизическим данным. Особенности глубинного строения кристаллического фундамента // *Геология и минеральные ресурсы*. 2011. № 6. С. 41–46.
 14. *Мордвинцев Д.О.* Новые взгляды на глубинное геологическое строение Ферганской впадины по геофизическим данным. Особенности рельефа структурной поверхности докембрийских образований // *Геология и минеральные ресурсы*. 2012. № 4. С. 55–60.
 15. *Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР*. — М.: Наука, 1977. 536 с.
 16. *Ребецкий Ю.Л.* Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристикам трещин. — Дис. ... д. физ.-м. н. — (ИФЗ РАН, г. Москва. 2003), 455 с.
 17. *Садыков Ю.М., Нурматов У.А.* Сейсмоструктурная геология Западного Тянь-Шаня // *Проблемы сейсмологии*. 2021. № 2. Т. 3. С. 61–73.
 18. *Таль-Вирский Б.Б., Алексеев В.П., Зуннунов Ф.Х.* Тектоническая карта Ферганской межгорной впадины. — М-б 1 : 500000. — Ташкент: ФАН, 1972.
 19. *Таль-Вирский Б.Б., Зуннунов Ф.Х.* Тектоническое районирование Ферганской впадины по геофизическим данным // *Геотектоника*. 1972. № 1. С. 119–123.
 20. *Шерман С.И., Лунина О.В.* Новая карта напряженного состояния верхней части литосферы Земли // *ДАН*. 2001. Т. 378. № 5. С. 672–674.
 21. *Anderson E.M.* The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain. — Ed. by E. Masson, (Oliver&Boyd. Edinburgh. UK. 1951), pp. 206.
 22. *Atabekov I.* Earth Crust's stresses variation in Central Asian earthquake's region // *Geodes. Geodynam.* 2020. Vol. 11. Is. 4. P. 293–299.
 23. *Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Reiter K., Tingay M., Wenzel F., Xie F., Ziegler M.O., Zoback M.L., Zoback M.* The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales // *Tectonophysics*. 2018. Vol. 744. P. 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
 24. *Leonov M.G., Rybin A.K., Batalev V.Yu., Matyukov V.E. & Shchelochkov G.G.* Tectonic structure and evolution of the Hissar–Alay mountain domain and the Pamirs // *Geotectonics*. 2017. Vol. 51. P. 566–583.
 25. *Narr W., Suppe J.* Kinematics of basement-involved compressive structures // *Am. J. Sci.* 1994. V. 294. № 7. P. 802–860.
 26. *Rebetsky Yu.L., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A.* Stress State of Uzbekistan's Seismically Active Areas // *Seismic Instruments*. 2020. Vol. 56. № 6. P. 679–700. <https://doi.org/10.3103/S0747923920060079>
 27. *Suppe J.* Geometry and kinematics of fault-bend folding // *Am. J. Sci.* 1983. V. 283. № 7. P. 684–721.
 28. *Zoback M.L.* First and second modern pattern of stresses in the lithosphere: The World stress map project // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. B8. P. 11 707–11 728.
 29. *Zoback M.L., Zoback M.* Lithosphere stress and deformation // *Treatise of Geophys.* 2007. P. 255–271. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53802-4.00115-9>

**Modern Active Tectonics of the Fergana Depression (Uzbekistan)
Based on the Results of Tectono-Physical Reconstruction
of Crustal Stress and Mathematical Modeling of the Velocity Field**

I. U. Atabekov^{a, *}, Yu. M. Sadykov^a, R. S. Ibragimov^a

*^a Mavlyanov Institute of Seismology, Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan,
st. Zulfiyakhanum, bld. 3, 100028 Tashkent, Uzbekistan*

**e-mail: atabekovi@mail.ru*

The seismotectonic process in the Fergana depression is caused by neotectonic activation of the earth's crust. This process contributes to maintenance of high seismic potential of the region, as evidenced by strong and destructive earthquakes, which took place here from ancient times till now and the preserved traces of paleoseismo-dislocation. Strong earthquakes are spatially and genetically connected with the areas of intense and differentiated movements in the latest and modern times, with the zones of active fractures in the earth's crust. They participate in formation of neotectonic and modern structure and development of relief of Fergana depression. In tectonic zoning, instrumental data obtained by measuring the velocities of movement of geological structures are used. It is assumed that the nature of the movement determines the critical stresses, the excess of which leads to the occurrence of earthquakes. At the same time, the results of modeling the stress state of the earth's crust give a complex scenario, from which it is not always possible to isolate the main direction of forces. Moreover, various methods of modeling the stress-strain state of the earth's crust give incompletely mutually coinciding results. In this article, we compare the stress state of the earth's crust and the displacement velocities obtained by numerically solving the equations of equilibrium of continuous media with the reconstructed stresses based on the mechanisms of the earthquake source for the Fergana depression.

Keywords: Neotectonics, modern tectonic movements, mathematical model, crustal stress, Fergana depression, Western Tien Shan