

УДК 550.34

СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И РАЗВИТИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ЗОНЕ КОЛЛИЗИИ ЗАПАДНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ С ПАМИРСКОЙ ДУГОЙ

© 2023 г. Ю. М. Садыков¹, И. У. Атабеков¹ *, Р. С. Ибрагимов¹

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

*e-mail: atabekovi@mail.ru

Поступила в редакцию 07.02.2023 г.

После доработки 29.03.2023 г.

Принята к публикации 16.04.2023 г.

Сейсмоструктура Западного Тянь-Шаня обусловлена коллизионными процессами в зоне взаимодействия Южного Тянь-Шаня и Памирской дуги. Этот процесс способствует поддержанию высокого сейсмического потенциала региона, о чем свидетельствуют прошедшие здесь с 838 года по настоящее время разрушительные землетрясения и их следы — сейсмодислокации. Сильные землетрясения генетически связаны с участками интенсивных движений в неоген-четвертичное и современное время, с зонами активных разрывных нарушений. Составлена усовершенствованная карта активных разломов Западного Тянь-Шаня и на ее основе с помощью уравнений Стокса построена математическая модель напряженно-деформированного состояния земной коры. Дополнительно в модель включены зоны динамического влияния Южно-Ферганского и Северо-Ферганского разломов. В результате получена значительная поправка в распределении напряжений в земной коре региона. Проанализированы поля скоростей перемещений современных движений Западного Тянь-Шаня соответствующие данным GPS. Векторы скоростей перемещений группируются по направлению в несколько зон. Узлы пересечения или сочленения движений разных направлений рассматриваются как наиболее тектонически напряженные участки. На основе этих узлов и по полученным напряжениям выделяются наиболее активные сейсмические зоны. Они сравниваются с аналогичными областями с высокой концентрации сильных землетрясений.

Ключевые слова: неотектоника, современные тектонические движения, математическая модель, напряженное состояние земной коры, коллизия, Западный Тянь-Шань, Памирская дуга

DOI: 10.31857/S0016853X23030062, EDN: XMCXRM

ВВЕДЕНИЕ

Неотектонический анализ Западного Тянь-Шаня позволил выделить тектонические блоки разного ранга, ограниченные активными разрывными нарушениями. Западный Тянь-Шань характеризуется высоким уровнем сейсмической активности на уровне землетрясений с магнитудой $M > 5.0$. Сильные землетрясения здесь происходят неравномерно во времени и пространстве. По времени они сгруппированы в периоды сейсмических активизаций и затишья, в пространстве — локализованы в пределах достаточно компактных областей. Среднесрочное прогнозирование землетрясений в регионе, наряду с сейсмологическими анализом критических ситуаций, необходимо проводить одновременное исследование тектонически опасных структур, формирующих современное напряженное состояние

массива горных пород. Кинематике разрывов в очагах происходящих землетрясений посвящено достаточное количество исследований, в которых напряженное состояние земной коры изучено большей частью методом катакластического анализа разрывных смещений по механизмам очагов землетрясений [10, 20, 22, 23, 27, 30–32], но очень мало публикаций по моделированию локальных полей напряжений [18, 19].

С недавних пор рассматриваемая территория исследуется построением математической модели напряженно-деформированного состояния на основе уравнений Стокса [2–4], результаты которых верифицируются имеющимися оценками напряжений и данными GPS мониторинга [5–7, 11–13, 33].

Нами было получено решение модельной задачи напряженного состояния Западного Тянь-

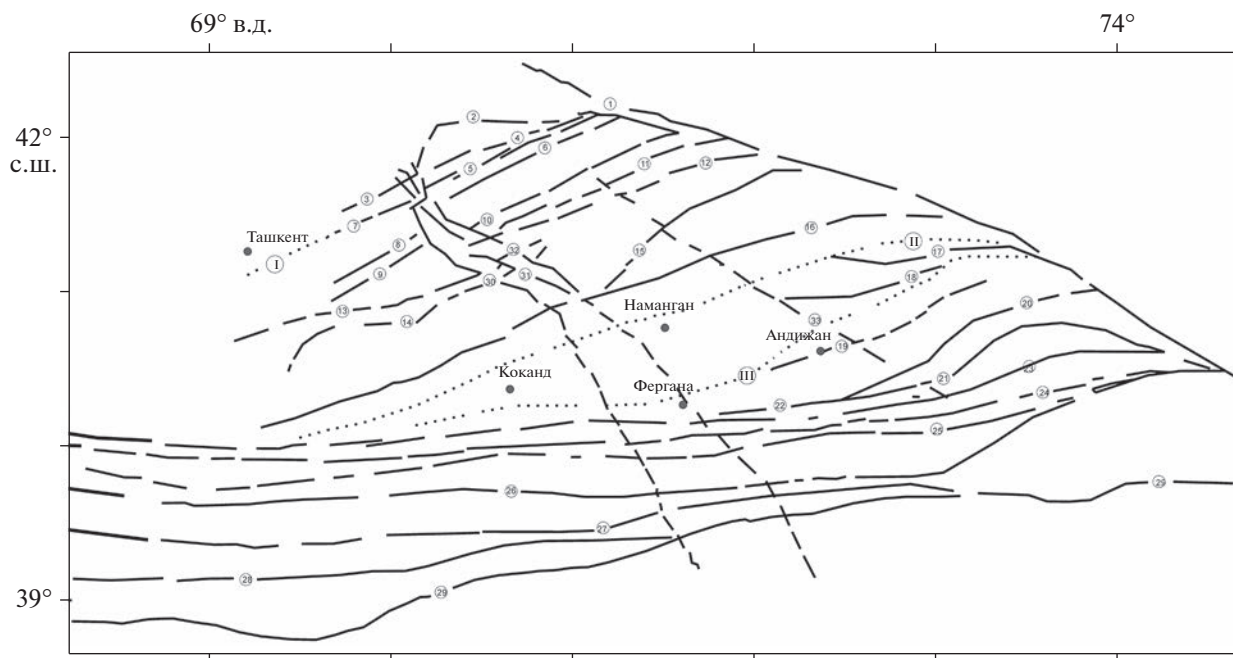


Рис. 1. Активные разломы Западного Тянь-Шаня (по данным [8, 9, 14–16, 21, 24, 25, 28, 29], с изменениями и дополнениями).

Разломы (цифры в кружках):

1 – Таласо-Ферганский; 2 – Аксу-Майдантальский; 3 – Богоналинский; 4 – Северо-Угамский; 5 – Угам-Майдантальский; 6 – Пскемский; 7 – Каржантауский; 8 – Сюрень-Атинский; 9 – Сукоковский; 10 – Южно-Пскемский; 11 – Санда-лашский; 12 – Чаткальский; 13 – Северо-Ангренский; 14 – Южно-Ангренский; 15 – Чаткало-Атайнакский; 16 – Северо-Ферганский; 17 – Баубашатинский; 18 – Кучкаратинский; 19 – Кугардский; 20 – Талдысуйский; 21 – Куршабский; 22 – Карачатырский; 23 – Южно-Ферганский; 24 – Нуратау-Катранский; 25 – Актау-Талдыкский; 26 – Южно-Актау-Туркестанский; 27 – Каратау-Зарафшанский; 28 – Главный Гиссарский; 29 – Гиссаро-Кокшальский; 30 – Кумбель-Коканд-Хайдарканский; 31 – Кенколь-Пап-Чимионский; 32 – Арашан-Пап-Чимионский; 33 – Сайрам-Андижан-Ошский.

Флексурно-разрывные зоны (пунктир): I – Приташкентская; II – Северо-Ферганская; III – Южно-Ферганская.

Шаня, с учетом активных разломов первого ранга [3, 4]. Эти решения проанализированы и сопоставлены с инструментальными данными. Получено удовлетворительное согласие.

Целью данной статьи является развитие разработанной нами математической модели путем ввода в модель полученных данных о зонах динамического влияния Северо-Ферганского и Южно-Ферганского разломов. Решение математической задачи применяется для анализа особенностей тектоники региона.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ТЕКТОНИКА ЗАПАДНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

В тектонических структурах Западного Тянь-Шаня наблюдается высокая степень унаследованности современных движений новейшими тектоническими движениями. Карта амплитуд новейших тектонических движений Западного Тянь-Шаня усовершенствована с выделением разломов различного ранга, установленных авторами [8, 9, 14–16, 21, 24, 25, 28, 29] (рис. 1).

На карте получили четкое выражение подвижные и устойчивые участки, а в их пределах – отдельные структурные формы (морфоструктуры). Отображая суммарную величину поднятий и опусканий исходной поверхности, изолинии на карте очерчивают форму новейших структур разного ранга. Изолинии суммарных деформаций являются проекцией на горизонтальную плоскость суммы вертикальных и горизонтальных перемещений. При условии, если Западный Тянь-Шань принять за неотектоническую структуру 1-го ранга, то выделяемые на карте следующие неотектонические блоки образуют структуры 2-го ранга: Чаткало-Кураминский, Ташкентско-Голдностепский, Ферганский, Таласо-Ферганский и Южно-Тянь-Шаньский. В пределах блоков 2-го ранга выделяются соответствующие неотектонические блоки 3-го ранга и так далее.

Одним из определяющих факторов современной структуры неотектонических движений, ориентацией и морфологией разрывных нарушений Западного Тянь-Шаня являются активные разрывные нарушения. Большинство сильных и катастрофических землетрясений связано с разло-

мами земной коры. Современная сейсмическая активность разрывных нарушений характеризуется комплексом геолого-геофизических параметров, удостоверяющих их тектоническую активность в новейший, четвертичный и современный этапы развития.

Следующие факторы и процессы позволили разделить разломы на 1–3 ранги:

- отношение разломов к тектоническим структурам разных рангов,
- проявленная сейсмичность, включая палеосейсмодислокации;
- данные геофизики, геохимии, космической геодезии и аэрокосмической съемки.

Как показал анализ сети разломов, развитых в пределах Западного Тянь-Шаня, глубинные характеристики, морфология, и другие параметры со временем могут меняться. Несущественно меняются только их простирания, что дало возможность предположить, что сеть разломов заложена в период раннего протерозоя или раньше.

В пределах Западного Тянь-Шаня активность проявляют в основном три направления регматической сети:

- северо-восточная (поперечно Тянь-Шаньская);
- северо-западная (Каратауская);
- субширотная (Тянь-Шаньская).

Указанные направления контролируют новейший структурный план региона и отвечают основным параметрам современной геодинамики. По отношению к новейшим структурам они разделяются на краевые и внутренние.

Краевые разломы, являясь структурно-контролирующими и разграничивая разнонаправленно развивающихся тектонических блоков (антиклинальных и синклинальных), обладают повышенным сейсмотектоническим потенциалом.

К краевым разломам относятся (см. рис. 1):

- Таласо-Ферганский,
- Аксу-Угам-Богоналинский,
- Северо-Ферганский,
- Южно-Ферганский.

Сравнительно меньшей сейсмичностью и частотой проявления сильных землетрясений характеризуются внутренние разломы, определяющие дифференцированный характер движений внутри тектонических блоков. К таким разломам категории относятся следующие разломы – Северо-Угамский, Угам-Майдантальский, Пскемский, Каржантауский, Сюренатинский, Сукокский, Южно-Пскемский, Сандашский, Чаткальский, Северо-Ангренский, Южно-Ангренский, Чаткало-Атойнокский, Баубашатинский, Кучкаратинский, Кугартский, Талдысуйский, Куршабский, Карачатырский, Нурата-Катранский, Каратау-Зараф-

шанский, Кумбель-Коканд-Хайдаркаский, Кенкольский, Арашанский, Сайрам-Андижан-Ошский.

Особое положение занимают флексурно-разрывные зоны. Располагаясь в крупных впадинах и прогибах, они представляют собой сложное сочетание изгибов и разрывных дислокаций. Во всех флексурно-разрывных зонах также возникали разрушительные землетрясения. На исследуемой территории выделены следующие флексурно-разрывные зоны – Приташкентская, Северо-Ферганская и Южно-Ферганская.

РАЗВИТИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАПАДНО-ТЯНЬ-ШАНЬСКОЙ МИКРОПЛИТЫ

Объектом математической модели является территория Западного Тянь-Шань, в пределах географических координат (39° – 43° с.ш.; 67° – 76° в.д.), находящаяся на территории Узбекистана.

Результаты нашей базовой математической модели напряженно-деформированного состояния этой территории, ограниченной Таласо-Ферганским, Аксу-Майданталь-Богоналинским, Гиссаро-Коокшальским разломами и основных региональных Северо-Ферганским и Южно-Ферганским разломами, а также рельефов земной поверхности и подошвы земной коры (поверхность Мохо), отражают усредненную динамическую обстановку исследуемой территории в течение неотектонического этапа [3].

В базовой модели получены поля векторов скоростей перемещения земной коры Западного Тянь-Шаня, как решение уравнений Стокса с граничными данными напряжений и скорости перемещений, при условии неподвижности движений на параллели 43° с.ш. (рис. 2).

Исследуемая территория была разделена на блоки, имеющие сходное направление векторов скоростей перемещения [3]. Границы блоков удовлетворительно согласуются с геолого-геофизическими и сейсмическими данными.

Детальный учет геолого-геофизических признаков рассматриваемой области при математическом моделировании дает более реальную тектоническую картину, но учет зоны [4] динамического влияния Южно-Ферганского разлома показал немного отличающееся распределение максимальных напряжений без учета данной зоны [3].

В данной работе мы дополнительно ввели в нашу математическую модель зоны динамического влияния Северо-Ферганского разлома (рис. 3).

Решение уравнений в частных производных и, в частности уравнения Стокса полностью определяется заданием граничных условий. При различных граничных условиях получаются существенно отличающиеся векторные поля скоростей.

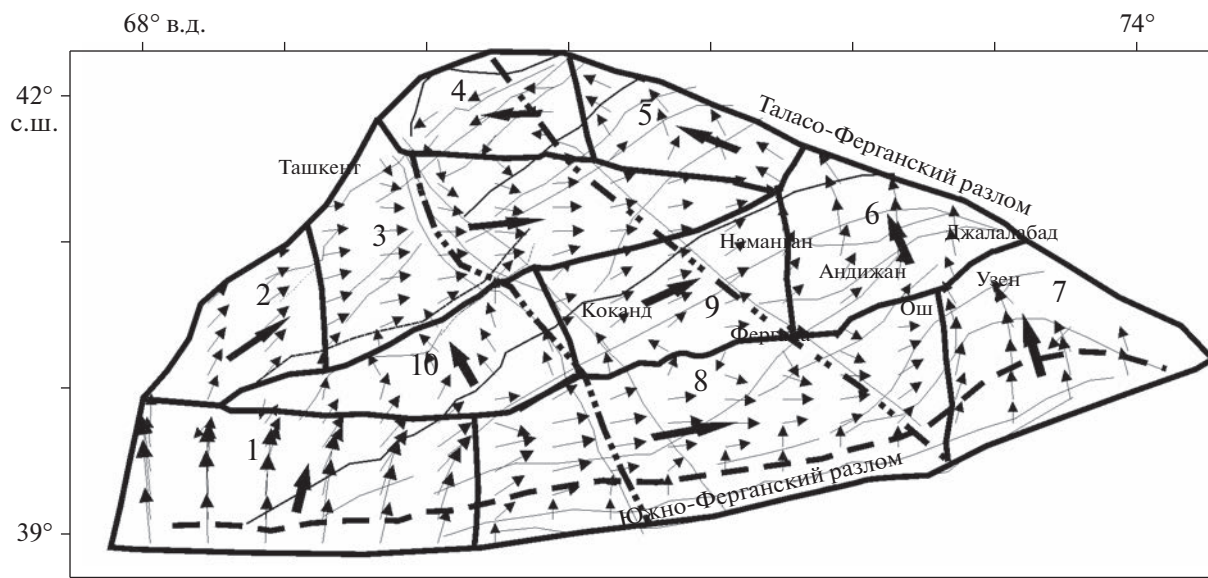


Рис. 2. Схема поля векторов скоростей перемещения земной коры Западно-Тянь-Шаньской микроплиты, полученные по решению математической модели (по данным [2]). Поля однонаправленных векторов (показаны тонкими стрелками) объединены в блоки (вектора показаны жирными стрелками) и пронумерованы.

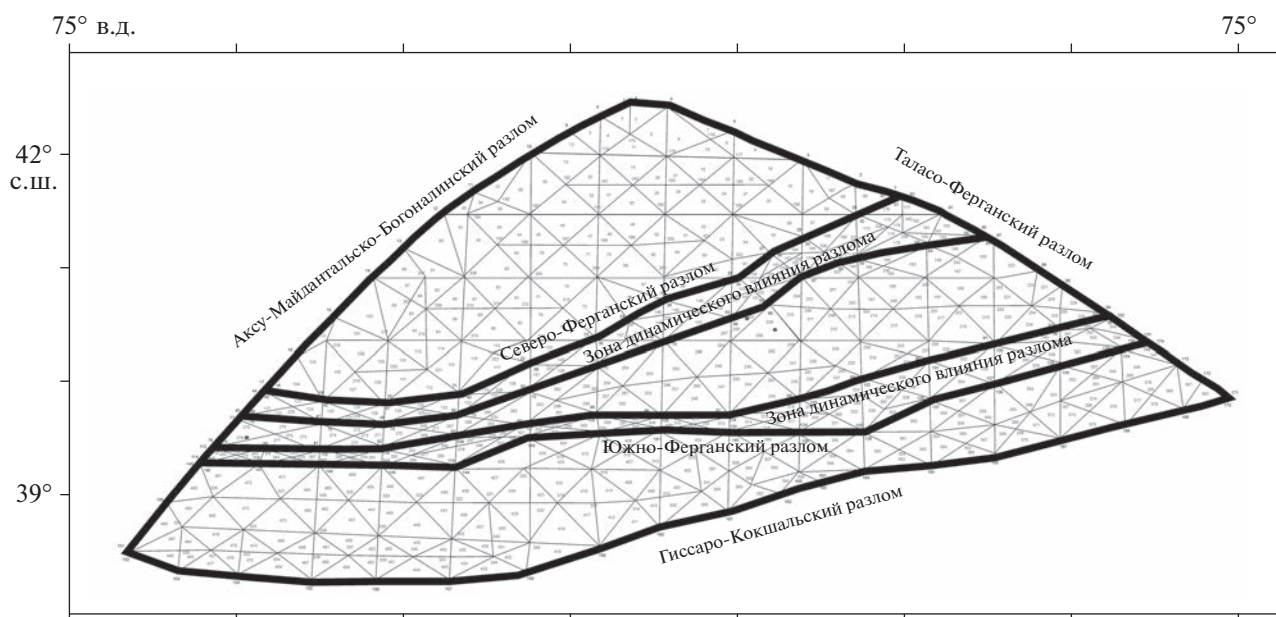


Рис. 3. Расчетная область математической модели напряженно-деформированного состояния Западного Тянь-Шаня.

В данной статье граничные условия задачи Стокса соответствуют современным движениям земной поверхности по материалам GPS относительно центра Ферганской впадины [6] (рис. 4).

В пунктах наблюдений GPS, расположенных в северо-западной части Таласо-Ферганского разлома, скорости перемещений направлены на юг (см. рис. 4). На юго-западной части этого разлома,

находящегося в пределах Ферганского хребта, перемещения ориентированы на северо-запад. Обе группы направлений подчеркивают современную геодинамическую обстановку в зоне Таласо-Ферганского правостороннего сдвига. Решение уравнений Стокса с граничными условиями, соответствующими такому распределению скоростей перемещения, дает векторное поле отличающееся

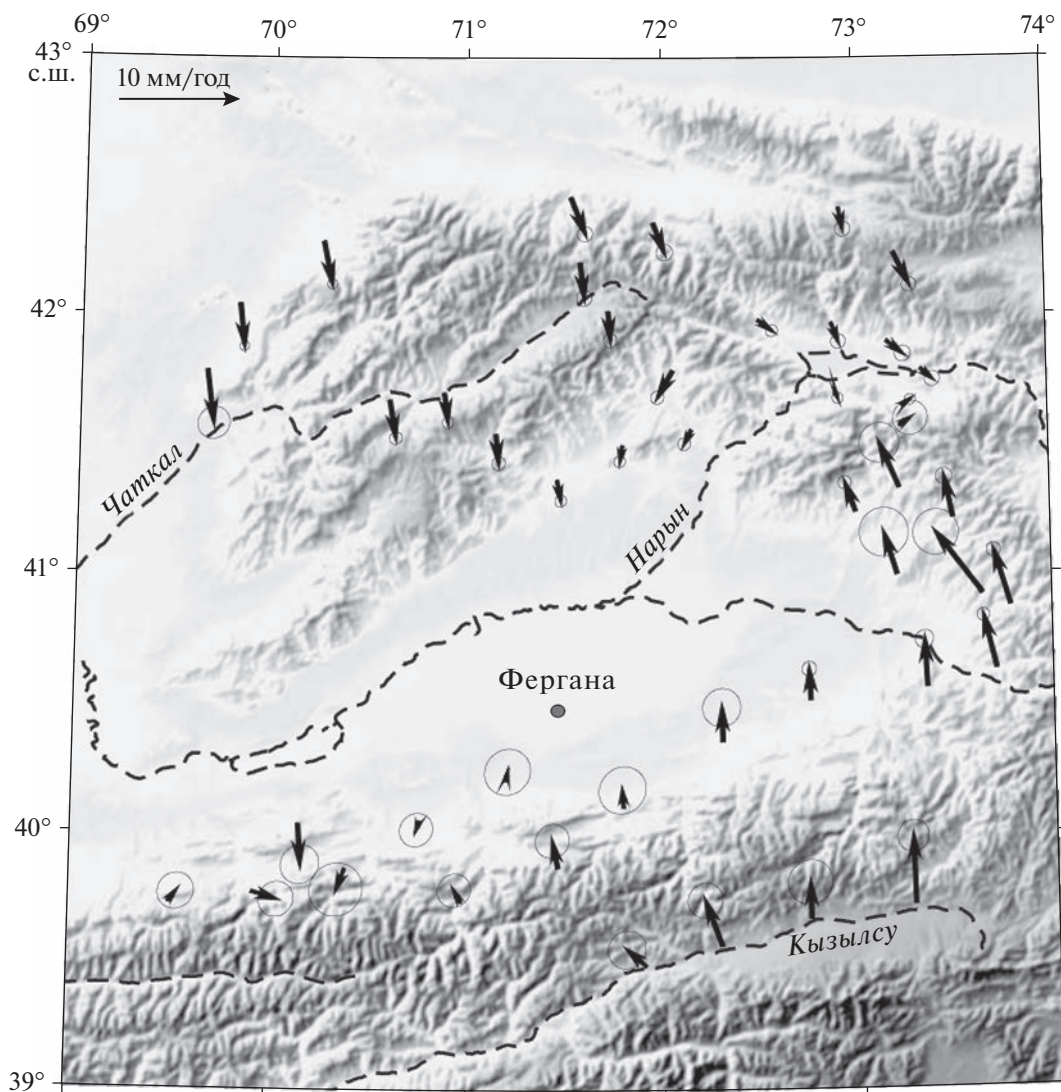


Рис. 4. Поля векторов горизонтальных скоростей перемещения земной коры Западного Тянь-Шаня, пересчитанные относительно центра Ферганской впадины (по данным GPS [6]). Показано: вектор направления (стрелки) и величины скоростей перемещений (эллипсы на концах векторов соответствуют 95%-м доверительным областям); русло реки (штрих-линия).

от прежнего решения, но больше соответствует скоростям полученные относительно центра впадины [6] (см. рис. 2, см. рис. 4, рис. 5).

При этом получена значительная поправка в распределении максимальных тангенциальных напряжений более, реально отражающая напряженную обстановку региона (рис. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты математической модели современных тектонических движений Ферганской впадины

Анализ скоростей перемещений, полученных решением численной модели, позволяет выделить несколько участков, где пересекаются векто-

ра различных направлений. Условно их можно назвать узлами напряженности, так как именно в этих узлах пересекаются или сочленяются направления движений участков земной коры, как противоположных направлений, так и направлениях, создающих между собой углы. Выделяются несколько типов узлов сочленения:

- на пресечении векторов в трех и более направлениях;
- на пересечении векторов в не менее двух направлениях;
- углы между векторами различаются от $\angle 30^\circ$ до $\angle 90^\circ$.

Эти узлы разделяют поле на части, где движения происходит в разных направлениях. В север-

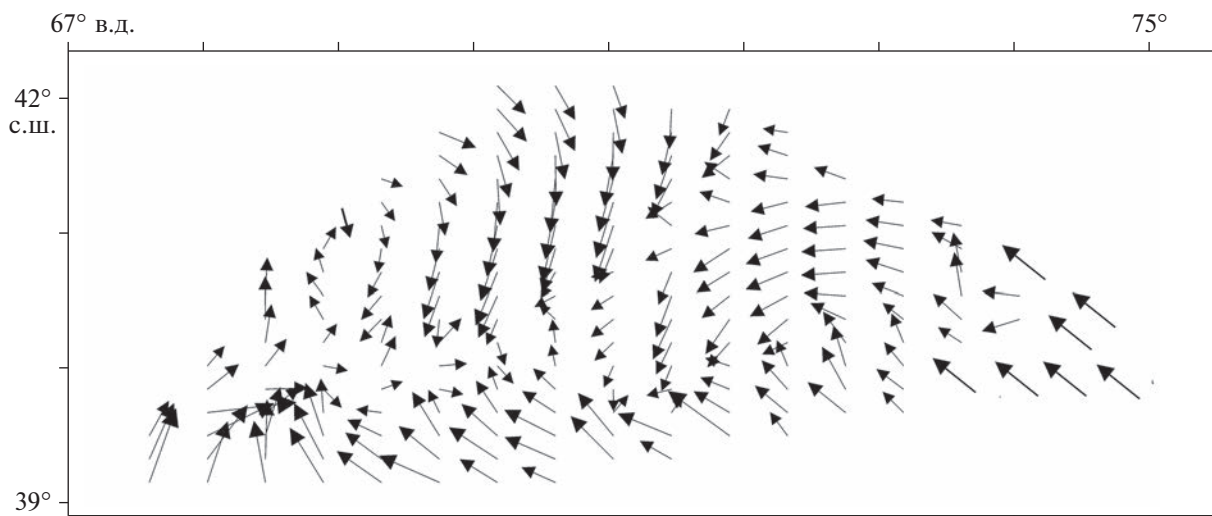


Рис. 5. Поле векторов скоростей перемещения земной коры Западно-Тянь-Шаньской микроплиты, полученные из решения уравнений Стокса с граничными условиями согласно современным движениям (по данным GPS [6], с изменениями и дополнениями).

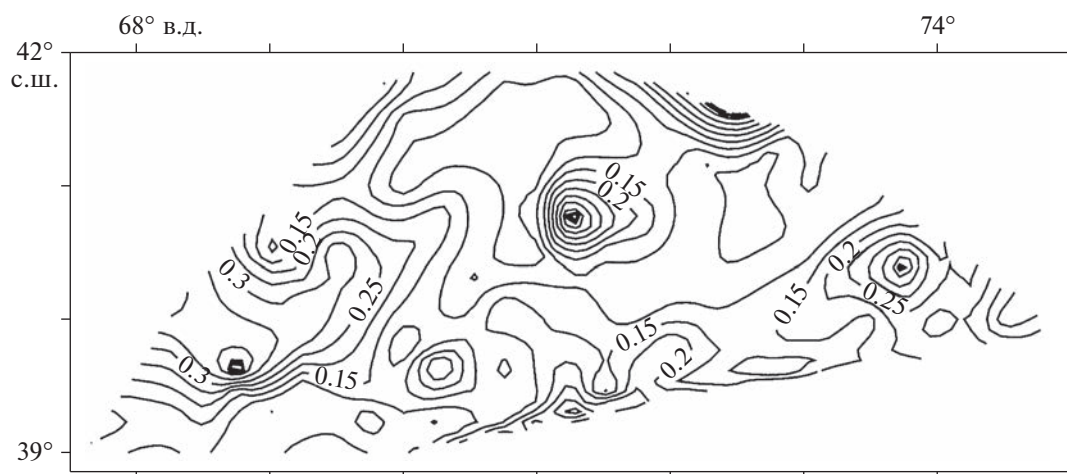


Рис. 6. Изолинии максимальных касательных напряжений $\sigma_{\tau}/2 \times 10^8$ Па на глубине 15 км по результатам численной модели, полученные с учетом динамической зоны влияния Северо-Ферганского и Южно-Ферганского разломов.

ной части направления векторов, в основном, направлены на юг, в южной части на северо-запад и в центральной части на юго-восток. Такое расположение полностью согласуется с векторами современных движений по материалам GPS Ферганского окружения в измененной системе отсчета [6].

Далее мы оконтурили узлы с учетом полученных напряжений и сопоставили со схемой активных региональных разрывных нарушений Западно Тянь-Шаньской микроплиты (см. рис. 6, рис. 7).

На дополненной карте выделяются транс-орогенные секущие зоны флексурно-разрывного типа, установленные по геолого-геоморфологи-

ским и геофизическим данным (см. рис. 1). Эти диагональные или поперечные, относительно неотектонических структур Западно Тянь-Шаньской микроплиты, зоны представляют собой полосы растяжения, для которых характерны сбросы. Пространственное совпадение поперечных трансорогенных секущих зон флексурно-разрывного типа с Таласо-Ферганским, Сайрам-Андижан-Ошским, Кумбель-Коканд-Хайдарканским и другими разломами северо-западного простирания объясняет поперечное погружение Чаткало-Курминского блока на юго-запад, и то, что для Ферганского блока наблюдается не только продольное, но поперечное ступенчатое строение до-мезозойского фундамента.

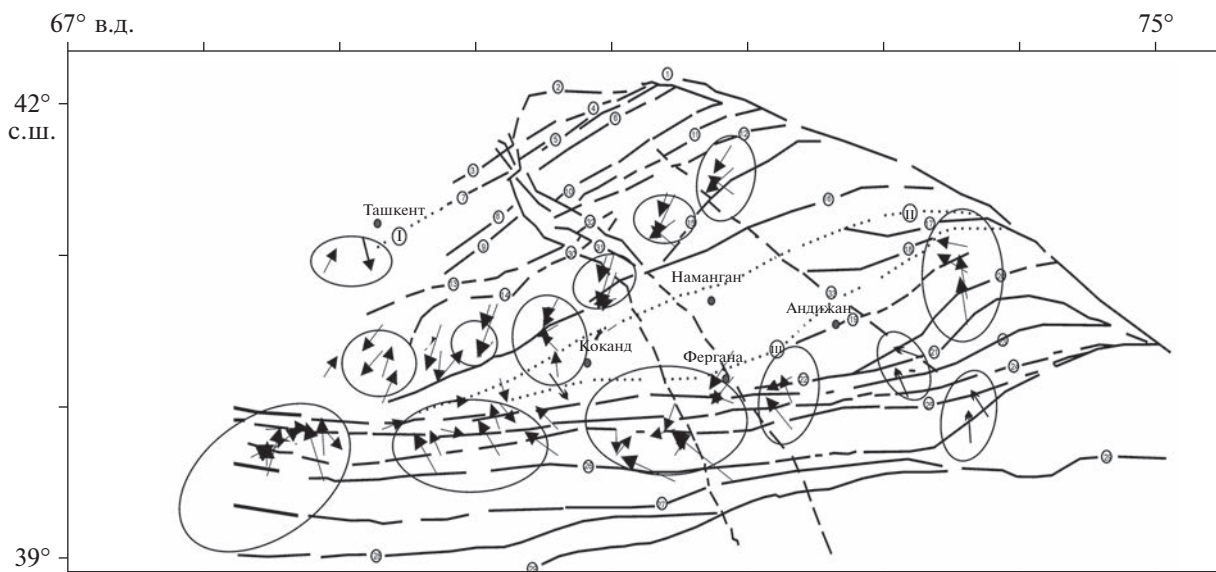


Рис. 7. Сопоставление зон напряженности с совмещенной картой активных разломов и новейшим структурным планом Западного Тянь-Шаня.

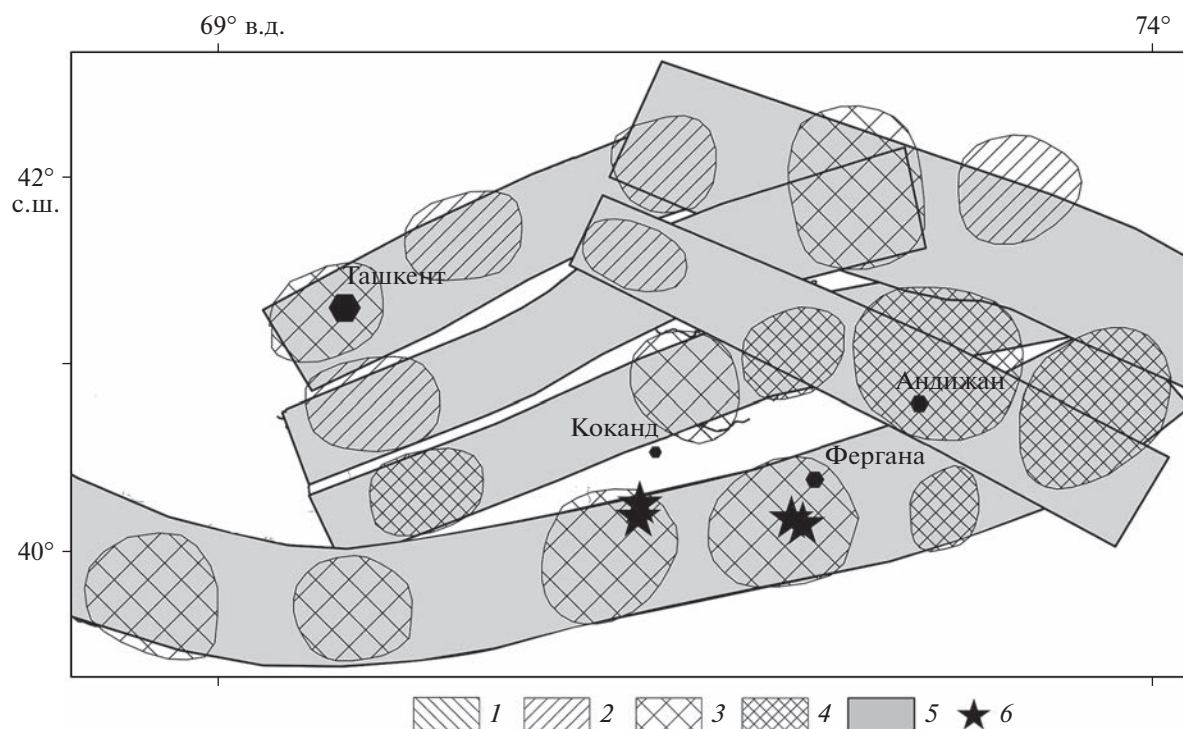


Рис. 8. Сейсмоактивные зоны территории Западного Тянь-Шаня и области ожидаемой сейсмической активизации на ближайшие годы по комплексу прогностических параметров сейсмического режима, по [1].

1–4 – области с различной вероятностью возникновения сильного землетрясения: 1 – низкая, 2 – невысокая, 3 – высокая, 4 – очень высокая; 5 – сейсмоактивные зоны; 6 – сильные землетрясения, произошедшие в 2020–2021 гг.

Проведенное исследование зон максимальных напряжений можно дополнить с анализом пространственного положения очагов сильных землетрясений.

Эпицентры сильных землетрясений, произошедших на территории Узбекистана, начиная с

исторического периода времени, располагаются не равномерно по сейсмоактивной зоне, а концентрируются в компактных областях с линейными размерами ~50–80 км, где реализованы оптимальные условия для крупномасштабного разрушения [1]. В связи с малой изменчивостью

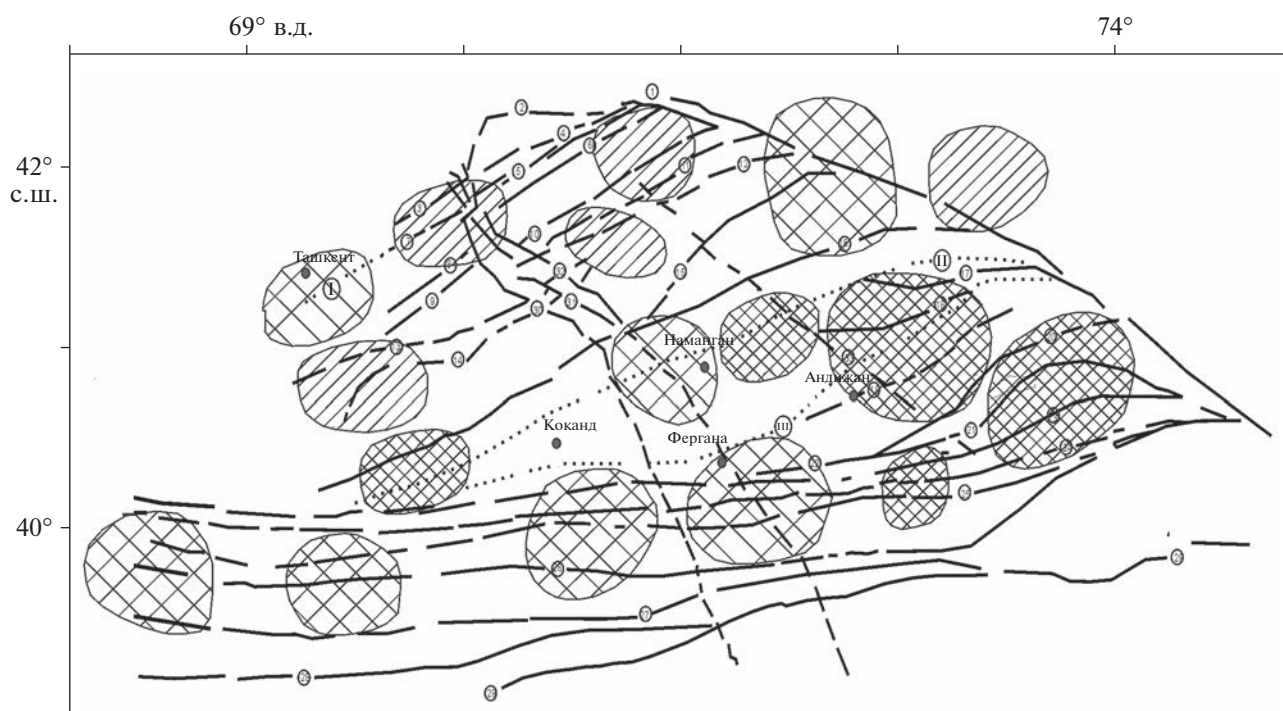


Рис. 9. Сопоставление участков концентрации эпицентров землетрясений с $M \geq 4.7$ ($K \geq 12.6$) с картой активных разломов.

Разломы (цифры в кружках):

1 – Таласо-Ферганский; 2 – Аксу–Майдантальский; 3 – Богоналинский; 4 – Северо-Угамский; 5 – Угам–Майдантальский; 6 – Пскемский; 7 – Каржантауский; 8 – Сюрень–Атинский; 9 – Сукокийский; 10 – Южно-Пскемский; 11 – Сандалашский; 12 – Чаткальский; 13 – Северо-Ангренский; 14 – Южно-Ангренский; 15 – Чаткало–Атайнакский; 16 – Северо-Ферганский; 17 – Баубашатинский; 18 – Кучкаратинский; 19 – Кугардский; 20 – Талдысуйский; 21 – Куршабский; 22 – Карачатырский; 23 – Южно-Ферганский; 24 – Нуратау–Катранский; 25 – Актау–Талдыкский; 26 – Южно-Актау–Туркестанский; 27 – Каратау–Зарафшанский; 28 – Главный Гиссарский; 29 – Гиссаро–Кокшальский; 30 – Кумбель–Коканд–Хайдарканский; 31 – Кенколь–Пап–Чимионский; 32 – Арашан–Пап–Чимионский; 33 – Сайрам–Андижан–Ошский.

Флексурно-разрывные зоны (пунктир): I – Приташкентская; II – Северо-Ферганская; III – Южно-Ферганская.

в течение десятков и сотен лет направленности протекания сеймотектонических процессов, определяющих современное напряженное состояние сейсмоактивных зон, именно эти области с высокой степенью вероятности проявят себя сейсмической активностью и в ближайшие десятилетия. В частности, для исследуемого района показаны области с высокой концентрации сильных землетрясений с $M \geq 4.7$ (рис. 8).

Выделенные области оцениваются как области ожидаемой активизации на ближайшие годы по комплексу прогностических параметров сейсмического режима [1] (см. рис. 8).

Хорошую сопоставимость показали области ожидаемой сейсмической активизации на ближайшие годы по комплексу прогностических параметров сейсмического режима и активные разломы Западного Тянь-Шаня (рис. 9).

Все выделенные прогнозные области сейсмической активизации сосредоточены в зонах активных разломов северо-восточных ориентаций и в узлах сочленения последних с разломами северо-западного направления. Однако, для выяс-

нения, который из отрезков разломов или их совокупность определяют сейсмическую активность прогнозируемой области, потребуется более детальный комплексный анализ прогнозных областей сейсмической активизации.

Сопоставительный анализ выделенных зон полученные как решение модельной задачи, так и по комплексу прогностических параметров сейсмического режима с усовершенствованной картой, показал их хорошую согласованность (см. рис. 1, см. рис. 7, см. рис. 9).

Дальнейшим исследованиям должны быть подвергнуты отрезки активных разломов, оказавшихся в пределах областей ожидаемой сейсмической активизации на ближайшие годы. По поводу частичного не совмещения узлов напряженности и областей ожидаемой активизации можно отметить, что они характеризуют напряженности в различных уровнях глубин. Области ожидаемой активизации по математической модели характеризуют глубины 15–17 км, тогда как узлы напряженности можно отнести приповерхностной части земной коры.

ВЫВОДЫ

Для проведения сейсмотектонического анализа напряженно-деформированного состояния земной коры в зоне коллизии Западного Тянь-Шаня с Памирской дугой авторы усовершенствовали карту активных разломов Западного Тянь-Шаня и расширили математическую модель напряженного состояния Западного Тянь-Шаня введением дополнительной зоны динамического влияния Северо-Ферганского разлома. По результатам проведенного исследования авторы пришли к следующим выводам.

1. Получена значительная поправка в распределении максимальных тангенциальных напряжений более реально отражающих напряженную обстановку региона.

2. Выделены напряженные участки земной коры Ферганской впадины по результатам численной модели;

3. Определены ожидаемые области сейсмичности по комплексу прогностических параметров сейсмического режима. Данные области сопоставлены с изолиниями тангенциальных напряжений, полученных по математической модели Западного Тянь-Шаня, — выявлено, что отдельным участкам активных разломов соответствуют зоны наиболее интенсивных напряжений.

Благодарности. Авторы искренне признательны анонимным рецензентам за ценные советы и замечания, авторы благодарны редактору за тщательное редактирование.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства инновационного развития Республики Узбекистан (гранты № 8-007, № 20170918111).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А., Ребецкий Ю.Л.* Напряженное состояние земной коры, сейсмичность и перспективы долгосрочного прогноза сильных землетрясений на территории Узбекистана // *Геология и геофизика*. 2022. Т. 7. № 12. С. 1733–1753.
2. *Атабеков И.У.* Опыт моделирования сейсмотектонического течения земной коры Центральной Азии // *Физика Земли*. 2021. № 1. С. 122–132. <https://doi.org/0.31857/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. *Атабеков И.У., Садыков Ю.М., Ибрагимов Р.С.* Современная активная тектоника Ферганской впадины (Узбекистан) по результатам тектонофизической реконструкции коровых напряжений и математического моделирования поля скоростей перемещений // *Геотектоника*. 2022. № 5. С. 76–84. <https://doi.org/10.31857/S0016853X22050034>
5. *Зубович А.В.* Данные спутниковой геодезии о современных движениях земной коры. — В кн.: *Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия)*. — Под ред. Н.П. Лаверова — М.: Научный мир, 2005. С. 201–218.
6. *Зубович А.В., Макаров В.И., Кузиков С.И., Моисенко О.И., Щелочков Г.Г.* Внутриконтинентальное горообразование в Центральной Азии по данным спутниковой геодезии // *Геотектоника*. 2007. № 1. С. 16–29.
7. *Зубович А.В., Мухамедиев Ш.А.* Метод наложенных триангуляций для вычисления градиента скорости горизонтальных движений: приложение к Центрально-Азиатской GPS сети // *Геодинамика и тектонофизика*. 2010. Т. 1. № 2. С. 169–185.
8. *Ибрагимов Р.Н.* Сейсмогенные зоны Среднего Тянь-Шаня. — Под ред. Г.А. Мавлянова — Ташкент: ФАН, 1978. 144 с.
9. *Ибрагимов Р.Н., Садыков Ю.М., Кадыров Ш.М., Рыжкова М.О., Ходжаев А.К., Зияудинов Ф.Ф.* Сейсмотектоника некоторых районов Узбекистана. — Под ред. О.М. Борисова — Ташкент: ФАН, 1980. 148 с.
10. *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. С. 435–454. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0532>
11. *Костюк А.Д., Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Яги Ю.* Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии // *Физика Земли*. 2010. № 3. С. 52–65.
12. *Кузиков С.И., Мухамедиев Ш.А.* Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центрально-Азиатской GPS сети // *Физика Земли*. 2010. № 7. С. 33–51.
13. *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/0.7868/S0002333717060023>
14. *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.
15. *Леонов М.Г.* Структурные ансамбли Южного Тянь-Шаня и геодинамические условия их образования. — В сб.: *Тектоника орогенных сооружений Кавказа и Средней Азии*. — Под ред. Ю.Г. Леонова, В.Е. Хаина — М.: Наука, 1990. С. 72–100.

16. Леонов М.Г., Рыбин А.К., Баталов Ю.В., Матюков В.Е., Щелочков Г.Г. Тектоническое строение и эволюция Гиссара-Алая и Памира. // Геотектоника. 2017. № 6. С. 37–57
17. Литосфера Памира и Тянь-Шаня. — Отв. ред. И.А. Фузайлов, Р.А. Мусин — Ташкент: ФАН, 1982. С. 221–222.
18. Осокина Д.Н., Никонов А.А., Цветкова Н.Ю. Моделирование локального поля напряжений системы разломов Сан-Андреас. — В сб.: Поля напряжений и деформаций в литосфере. — Под ред. — Под ред. А.С. Григорьева, Д.Н. Осокиной — М.: Наука, 1979. С. 205–227.
19. Осокина Д.Н., Гущенко О.И., Лыков В.И., Цветкова Н.Ю. Моделирование локальных полей тектонических напряжений, обусловленных системами глубинных разломов (на примере двух районов Средней Азии). — В сб.: Поля напряжений и деформаций в литосфере. — Под ред. А.С. Григорьева, Д.Н. Осокиной — М.: Наука, 1979. С. 185–204.
20. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. — Под ред. Ю.Г. Леонова — М: ГЕОС, 2017. 234 с.
21. Садыков Ю.М., Нурматов У.А., Шукуров З.Ф. Активные разломы Западного Тянь-Шаня. — В сб.: Сейсмологический атлас Узбекистана. — Под ред. Б.С. Юлдашева — Ташкент: ИС АН РУз, 2021. С. 79.
22. Сычева Н.А., Мансуров А.Н. Сравнение оценок деформации земной коры Северного и Центрального Тянь-Шаня, полученных на основе сейсмических и GPS —данных // Вестн. КРСУ. 2016. Т. 16. № 1. С. 178–182.
23. Шерман С.И., Лунина О.В. Новая карта напряженного состояния верхней части литосферы земли // ДАН. 2001. Т. 378. № 5. С. 672–674.
24. Якубов Д.Х., Ахмеджанов М.А., Борисов О.М. Региональные разломы Среднего и Южного Тянь-Шаня. — Под ред. Г.А. Мавлянова — Ташкент: ФАН, 1976. 146 с.
25. Ярмухамедов А.Р. Современные тектонические движения земной коры. — В кн.: Геология и полезные ископаемые Республики Узбекистан. — Под ред. О.М. Борисова — Ташкент: Университет, 1998. С. 446–459.
26. Atabekov I. Numerical models of earthquake's mechanism // J. Geodes. Geodynam. 2021. Vol. 12. Is. 2. P. 148–154.
<https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.03.002>
27. 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>
28. Mordvintsev D., Barrier E., Brunet M-F., Blanpied C., Sidorova I. Structure and evolution of the Bukhara–Khiva region during the Mesozoic: The northern margin of the Amu-Darya Basin (southern Uzbekistan). — In: *Geological Evolution of Central Asian Basins and the Western Tien Shan Range*. — Ed. by M.-F. Brunet, T. McCann, E.R. Sobel, (Geol. Soc. London, Spec. Publ. 2017. Vol. 427. Is. 1). P. 145–174.
<https://doi.org/10.1144/SP427.16>
29. Narr W., Suppe J. Kinematics of basement-involved compressive structures // Am. J. Sci. 1994. Vol. 294. No. 7. P. 802–860.
30. Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Sycheva N.A., Tatevossian R.A. Development of inversion methods on fault slip data stress state in orogens of Central Asia // Tectonophysics. 2012. Vol. 581. P. 114–131.
31. Zoback M.L. First and Second Modern Pattern of Stresses in the Lithosphere: The World Stress Map project // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97. No. B8. P. 11707–11728.
32. Zoback M.L., Zoback M. Lithosphere stress and deformation // Treat. Geophys. 2007. Vol. 6. P. 255–271.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53802-4.00115-9>
33. Zubovich F.V., Wang X., Scherba Y.G., Schelochkov G.G., Reilinger R., Reigber C., Mosienko O.I., Molnar P., Michajljow W., Makarov V.I., Li J., Kuzikov S.I., Herring T.A., Hamburger M.V., Hager B.X., Dang Y., Bragin V.D., Beisenbaev R. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions // Tectonics. 2010. Vol. 29 (TC6014). P. 1–23

Seismotectonic Analysis and Development of the Mathematical Model of the Stress-Strain State of the Earth's Crust in the Zone of Collision of the Western Tien Shan with the Pamir Arc

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

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

*e-mail: atabekovi@mail.ru

The seismotectonics of the Western Tien Shan is determined by collisional processes in the zone of interaction between the Southern Tien Shan and the Pamir arc. This process contributes to maintaining the high seismic potential of the region, as evidenced by the destructive earthquakes that have taken place here from ancient times to the present and their traces - seismic dislocations. Strong earthquakes are genetically associ-

ated with areas of intense movements in recent and modern times, with zones of active faults. An improved map of the active faults of the Western Tien Shan has been constructed and, on its basis, a mathematical model of the stress-strain state has been constructed using the Stokes equations. At the same time, the dynamic influence zones of the South Fergana and North Fergana faults are additionally included in the model. At the same time, a significant correction was obtained in the distribution of stresses in the earth's crust of the region. The velocity fields of modern movements of the Western Tien Shan corresponding to GPS data are analyzed. The displacement velocity vectors are grouped in the direction into several zones. The nodes of intersection or articulation of movements of different directions are assigned to the most tectonically stressed areas. The most active seismic zones are identified on the basis of these nodes and the resulting stresses. They are compared to similar areas with a high concentration of strong earthquakes.

Keywords: neotectonics, recent tectonic movements, mathematical model, crustal stress, collision, Western Tien Shan microplate, Pamir Arc