ГЕОТЕКТОНИКА, 2024, № 1, с. 88—98

УДК 551.24

МНОГОЯРУСНАЯ ТЕКТОНИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ ФЕРГАНСКОЙ ДЕПРЕССИИ (УЗБЕКИСТАН)

© 2024 г. И. У. Атабеков[1,*], Ю. М. Садыков[1], Ж. К. Мамарахимов[1]

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

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

Поступила в редакцию 25.03.2023 г.
После доработки 14.02.2024 г.
В печать 22.02.2024 г.

Геодинамическими особенностями Ферганской межгорной впадины являются наличие рифта при меридиональном сжатии региона и несоответствие расположения очагов землетрясений с границами неоднородностей слоев земной коры. Первая особенность решается по условиям многоярусной тектоники плит, которая, в отличие от классической, дает дополнительную возможность оценки нефтегазоносности впадины. Однако существующие гипотетические тектонические схемы не подкреплены математическими расчетами. Для выяснения этих особенностей нами разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния применительно к одному из поперечных разрезов земной коры Ферганской впадины, который имеет зонально неоднородное плотностное строение. Результаты математической модели показывают, что наличие блоков, различающихся плотностями, создают перемещения под действием горизонтальных напряжений сжатия. Также показано, что изолинии максимальных касательных напряжений располагаются близко к границам неоднородных зон, что указывает на наличие больших погрешностей при определении гипоцентров землетрясений.

Ключевые слова: многоярусная тектоника, геодинамика, сейсмичность, глубинные структуры, активные разломы, современные движения, численное моделирование

DOI: 10.31857/S0016853X24010054, **EDN:** HMCIAC

ВВЕДЕНИЕ

Высокая концентрация плотностных неоднородностей и резкие изменения мощности земной коры указывают на то, что в этих местах происходили или происходят тектонические движения, сопровождаемые разрушением земной коры [30, 31]. Структуры, где происходят современные тектонические движения, плотностные неоднородности в земной коре, можно считать тектоническими структурами, а границы между ними являются переходными зонами, где различия физических свойств достигают максимальных значений. Действие силы тяжести в структурах скольжения типа глубинных разломов становятся важным фактором.

Однако очаги землетрясений земной коры Ферганской депрессии по сейсмологическим данным не всегда коррелируют с границами плотностных неоднородностей. Другая особенность Ферганской депрессии состоит в том, что, находясь в условиях близмеридианного сжатия, она имеет рифтовый характер, свойственный зонам растяжения.

Н.А. Яблонская [31], придерживаясь идеи Э. Аргана [3] о многоярусной тектонике, установила наличие нескольких горизонтальных уровней срыва на глубинах до 5 км. На основе распределения сейсмичности в вертикальном разрезе была рассмотрена автономность развития верхней части земной коры относительно ее более глубоких слоев.

Многоярусная тектоника допускает перемещение не только по астеносфере, но и по поверхности Мохо и границе Конрада. Для исследования нефтегазоносности Сурхандарьинской мегасинклинали Узбекистана мы ранее проводили численное моделирование процессов складкообразования на основе многоярусной тектоники плит [1]. Однако в регионе Сурхандарьинской мегасинклинали мы применяли напряжения сжатия для исследования взбросовых движений, считая кайнозойские, мезозойские и палеозойские слои зонально однородными, но отличающимися друг от друга физическими параметрами [1].

В развитие многоярусной тектоники было принято представление о влиянии упругопластического деформирования на более глубокие слои земной коры, при котором горизонтальная расслоенность литосферы увеличивается от древних платформ к молодым платформам и далее — к складчатым областям коры [18, 19, 32, 35, 36]. Аналогичный характер расслоенности свойственен вертикальной раздробленности литосферы.

В периоды изменения геодинамической обстановки горизонтальные движения часто сменяются вертикальными движениями, при которых происходит изостатическое выравнивание литосферы.

Однако Ферганская депрессия является рифтовой впадиной и здесь сбросовые движения наличествуют, поскольку по реологическим свойствам силикатов в разных $P–T$ условиях и из-за особенностей теплового потока одиночный рифт континентальной литосферы более пластичен.

Е.Е. Милановский с соавт. [21] полагают, что при региональном сжатии литосферы возможны как сбросовые, так и взбросовые движения.

Учитывая важность проблемы современной активной тектоники, мы решили построить математическую модель для одной из характерных профилей Ферганской депрессии для выяснения взаимоотношения глубинного строения бассейна на основе механики сплошных сред.

С этой целью мы провели анализ сейсмических данных, глубинного плотностного строения, современных тектонических движений, некоторых продольных и поперечных профилей территории. При проведении тектонического анализа был использован картографический метод, который позволяет соотносить разномасштабные карты, отражающие глубинное строение. Также был применен способ декомпозиции, позволяющий замену некоторых элементов использованных карт и схем на более современные.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЛОЕВ ЗЕМНОЙ КОРЫ ФЕРГАНСКОЙ ВПАДИНЫ

Геодинамика Ферганской впадины, как и Западно-Тянь-Шаньской микроплиты, обусловлена коллизионными процессами в зоне взаимодействия Южного Тянь-Шаня и Памирской дуги. Одной из главных форм современной геодинамической активности является сейсмичность.

От 838 года н.э. и до наших дней в пределах Ферганской впадины и сопредельных территориях возникли более 90 землетрясений с магнитудой $M \geqslant 4.5$ и из них:

– 13 землетрясений ($M \geqslant 6.0$);

– 44 землетрясения ($5.9 \geqslant M \geqslant 5.0$);

– 33 землетрясения $4.9 \geqslant M \geqslant 4.5$.

Практически все землетрясения возникали в зонах динамического влияния активных разломов [3, 7–10, 12, 13].

Ширина зоны влияния активных разломов варьирует в зависимости от ее длины.

Если разлом выражен в палеозойских породах, то учитываются следы воздействия разлома, симметрично по обе стороны разлома — по полосам интенсивного деформирования и дробления пород, повышенной трещиноватости и по другим параметрам.

В кайнозойских отложениях Ферганской впадины эти параметры дополняются результатами дешифрирования аэро- и космоснимков и топографических карт, анализом гидросети и геоморфологических элементов [11, 37].

Также использовались сейсмодислокации, выявленные по результатам макросейсмического изучения эпицентральных зон сильных землетрясений, и макросейсмические параметры, такие как [12–17, 33, 34]:

– пространственные размеры первой изосейсты;

– морфологические данные активных разломов с учетом глубины их проникновения;

– данные о сильных землетрясениях, являющиеся убедительными доказательствами связи землетрясений с активными разломами.

Для выявления тенденции современных движений имеются новейшие, молодые и современные движения и составленные карты современных вертикальных движений тектонических структур Средней Азии [33]. Карты дополнены нами сетью активных разломов [4]. Совместный анализ сейсмичности и неотектоники показал, что для горного обрамления Ферганской впадины характерны положительные скорости современных вертикальных движений (от +2 до +10 мм/год), а для самой Ферганской впадины — отрицательные скорости (от –2 до –10 мм/год).

Разломы, разделяющие впадину и ее горное обрамление, характеризуются напряженным состоянием и являются потенциально сейсмоопасными. Наличие напряжений растяжения подтверждают материалы по современному трещинообразованию [33].

В пределах Ферганской впадины участки трещинообразования располагаются в зоне динамического влияния Южно-Ферганской флексурно-разрывной зоны и повторяют ее простирание. Здесь выявлены сжимающиеся и растягивающиеся трещины. Особое значение представляют результаты геодезических измерений. Результаты нивелирования за период 1971–1974 гг. по линии Ташкумыр–Андижан–Ош показали аномальные отрицательные значения скорости вертикальных движений (–46±9 мм) на отрезке Андижан–Карасу [33].

Данные GPS мониторинга

Следующим важным элементом геодинамики являются материалы высокоточных измерений методами космической геодезии. Было отмечено, что перемещения к северу пунктов GPS, расположенных на Памире, в Северо-Западном Куньлуне и в Тариме, происходят с близкими скоростями 15–20 мм/год [11, 22, 37]. Это свидетельствует о том, что в настоящее время Памир и Тибет совместно перемещаются в сторону Тянь-Шаня.

В пределах Западного Тянь-Шаня можно выделить несколько районов, отличающихся ориентацией скоростей перемещения. В пунктах наблюдений GPS, расположенных в северо-западной части Таласо–Ферганского разлома в пределах Чаткало–Кураминского блока, перемещения направлены на юг.

На юго-западной части Таласо–Ферганского разлома, в пределах одноименного Таласо-Ферганского блока, перемещения ориентированы на северо-запад. Обе группы направлений подчеркивают современную геодинамическую обстановку в зоне Таласо–Ферганского правостороннего сброса-сдвига.

Группа пунктов наблюдения GPS, расположенных в пределах Чаткало–Кураминского регионе, ориентированы в южном направлении и подтверждают более раннее предположение о том, что к западу от Таласо–Ферганского сдвига на фоне меридионального сжатия происходит выталкивание блоков к западу с левосторонним (против часовой стрелки) вращением блоков.

Скорости, возникающие в пределах южных частей Ферганской впадины и Алайской долины (Южно-Тянь-Шаньский блок), ориентированы субмеридионально. По количеству данных о величине перемещений пункты наблюдений GPS, расположенных в равнинных частях (Ферганская впадина), статистически уступают пунктам GPS, расположенным в горных областях. Таким образом, материалы космической геодезии подтверждают субмеридиональную ориентацию напряжений сжатия, действующих в пределах Западного Тянь-Шаня и связанных, вероятно, с давлением Памирского выступа на Тянь-Шань.

Современные движения микроплит Средней Азии

Земная кора Средней Азии многослойная и имеет в плане блоковое строение [9, 12, 20]. Более стройную форму эти представления получили при разработке геодинамической модели многоярусной тектоники плит [18, 19, 31, 34]. В основу этой модели заложено перемещение плит и блоков как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях. Причиной движения микроплит служат, в основном, перемещения крупных плит (Индостанской, Аравийской и др.).

Ферганская впадина находится в зоне столкновении вышеупомянутых плит. Для изучения этих движений мы выбрали десять сейсмопрофилей Ферганской впадины (рис. 1, профили I–I′ — X–X′).

Восемь профилей пересекают впадину в поперечном сечении и два профиля — в продольном сечении [22–25]. Все поперечные профили практически повторяют друг друга. На всех профилях картируются три стратиграфических комплекса пород (сверху вниз) (рис. 2):

– мезо–кайнозойский;
– палеозойский:
– допалеозойский.

Мезо–кайнозойский и палеозойский комплексы стратифицированы.

В допалеозойском комплексе выделяются блоки, различающиеся плотностью пород**.** Кровельные части этих стратиграфических комплексов подобны.

На всех профилях I–I′ — X–X′ наблюдается обратная корреляция между рельефом поверхности Мохо и базальтами с вышележащими разделами земной коры (см. рис. 2).

Изменение морфологии вертикальных границ блоков с юго-востока на северо-запад представляет интерес для исследования.

На профиле I–I′ в палеозойских отложениях и нижележащих блоках вертикальные границы соответствуют разломам взбросового типа, т.е. напряжения сжатия (см. рис. 2). На последующих профилях плоскости разломов постепенно приближаются субвертикальному положению.

На профиле VII–VII′ они практически субвертикальны (см. рис. 2).

На профиле VIII–VIII′ плоскости разломов

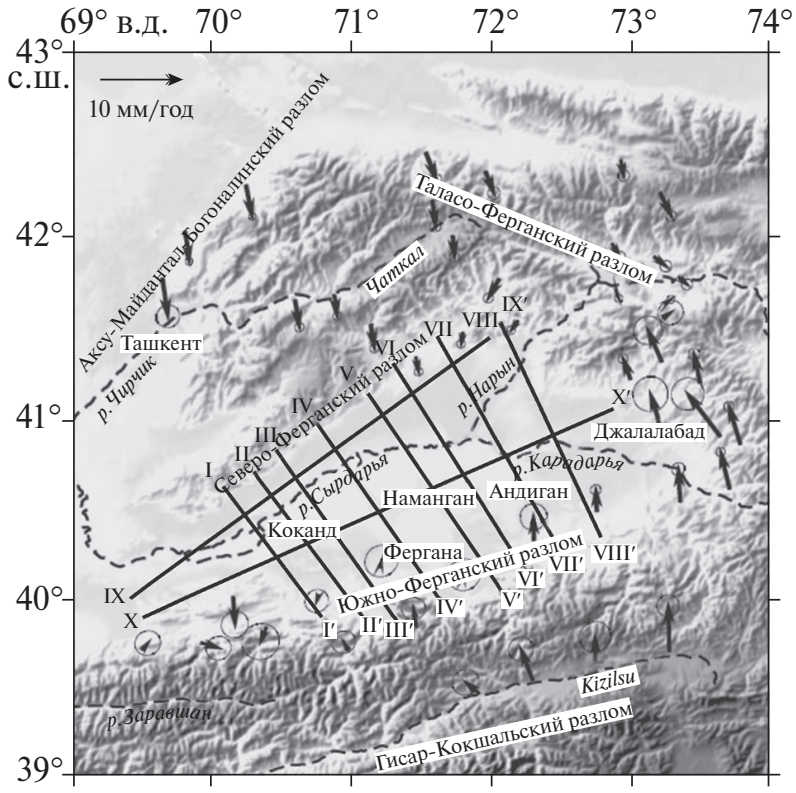


Рис. 1. Сейсмические профили I–I′ — X–X′ для построения плотностных моделей (по данным [23–26]).

центральной части впадины приобретают сбросовый характер (см. рис. 2).

На профилях IX–IX′ и X–X′ анализ геологических разрезов показал, что характер морфологии разломов и вертикальных границ допалеозойских блоков свидетельствует о преобладании растягивающих напряжений в продольном сечении Ферганской впадины (см. рис. 2).

Тектоническая деформация мезозой–кайнозойских отложений имеет прямую связь со складчатыми структурами палеозойского фундамента.

В работе [26] Ферганская впадина традиционно разделена на продольные северную, центральную и южную зоны складчатости.

Кумбель–Кокандский разлом разделяет Ферганскую впадину на западную и восточную блоки. Сравнительный анализ складчатых зон в блоках показал, что для западного блока характерен конвергентный стиль, для восточного — моновергентный.

Конвергентность образовалась за счет встречного двустороннего надвигания Чаткало–Кураминского и Южно-Тянь-Шаньского блоков. Моновергентность возникла за счет поддвига Южно-Тянь-Шаньского блока под Восточно-Ферганский блок.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ ФЕРГАНСКОЙ ВПАДИНЫ

Для построения численной модели была выбрана тестовая схема, которая отражает характерные особенности продольных профилей (рис. 3).

Схема ориентирована на северо-западное–юго-восточное направление в длину на протяжении 122 км.

Выделены три стратиграфических комплекса отложений (сверху-вниз):

– мезозойский;
– кайнозойские (MZ, KZ);
– осадочные отложения.

Осадочные отложения наложены на осадочно-вулканогенно-метаморфические породы. Мощность мезозой–кайнозойских отложений на самой прогнутой части впадины составлет более 10 км.

Для кайнозойской части разреза средняя плотность составляет 2.5 г/см^3. Для нижней мезозойской части средняя плотность равна 2.57 г/см^3.

Для большей части домезозойских осадочно-вулканогенно-метаморфических пород принята плотность в 2.67 г/см^3. Приведенные значения

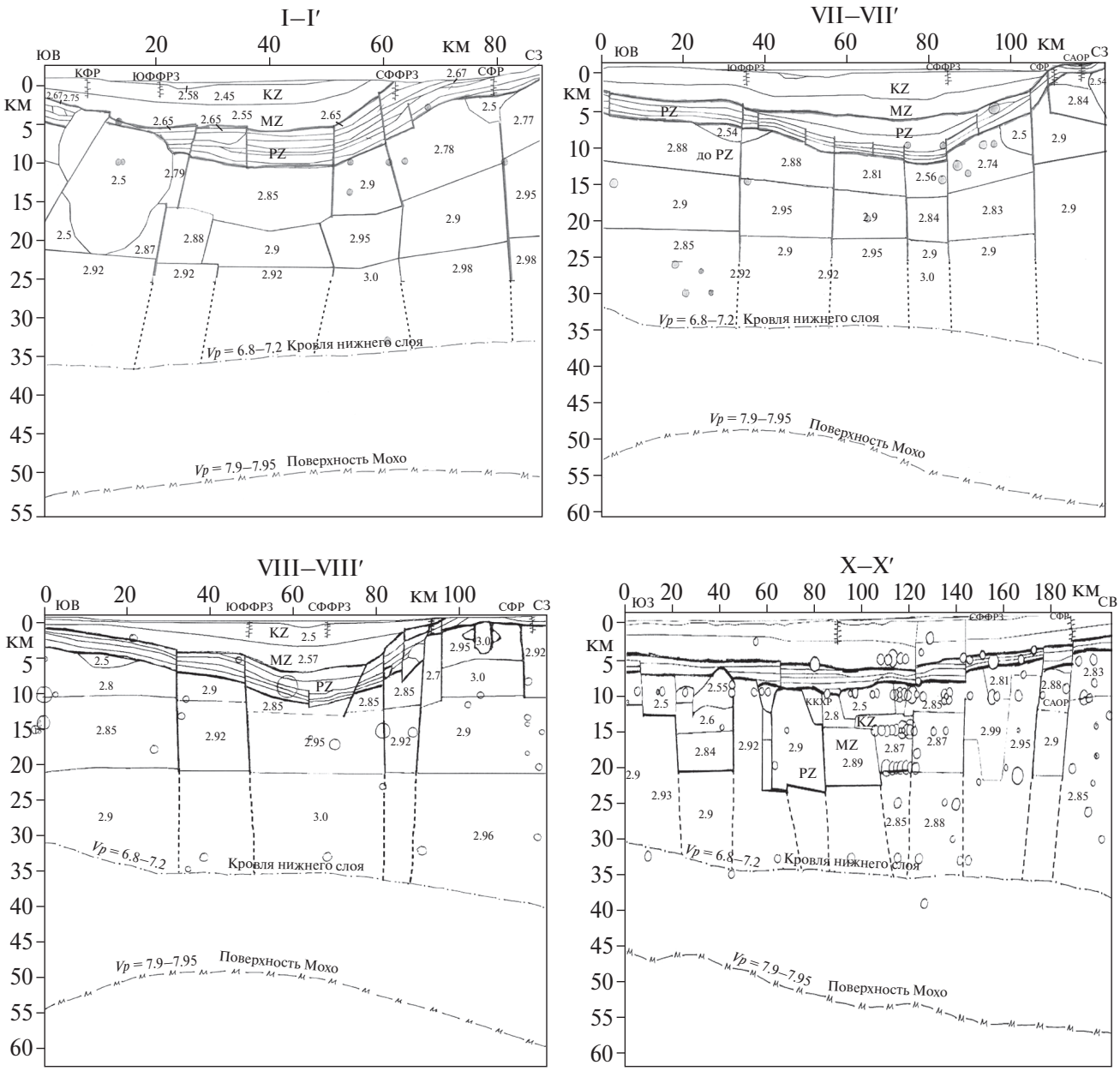


Рис. 2. Глубинный разрез сейсмических профилей I–I′, VII–VII′, VIII–VIII′ и X–X′ (по данным [23–26]).
Обозначено: гипоцентры землетрясений (кружочки); плотность блоков (арабские цифры).
Отложения: MZ — мезозойские, PZ –палеозойские;
разломы: СФР — Северо –Ферганский, ЮФР –Южно-Ферганский, САОР — Сайрам-Андижан–Ошский разлом;
флексурно-разрывные зоны: СФФРЗ — Северо-Ферганская, ЮФФРЗ — Южно-Ферганская.

плотностей рассчитаны по сейсмическим скоростям [25].

Ниже расположены допалеозойские блоки, различающиеся плотностью пород**.** Первый ряд блоков имеет различия плотности пород от 2.5 до 3.0 г/см^3, характерных для интрузивных и эффузивных образований. Блоки также отличаются размерами и конфигурацией.

Второй ряд блоков имеет более упорядоченную форму. Плотность пород меняется закономерно в сторону увеличения. Только крайний, расположенный в северо-западной части профиля, блок отличается плотностью (2.9 г/см^3) .

Ниже на глубинах 21–25 км выделяется третий ряд блоков с плотностью 2.9–3.0 г/см^3.

Ранее нами были получены средние горизонтальные напряжения земной коры Ферганской впадины, в том числе, на южной и на северной части границ [4, 5]. Мы используем эти данные в качестве граничных условий на южном и север-

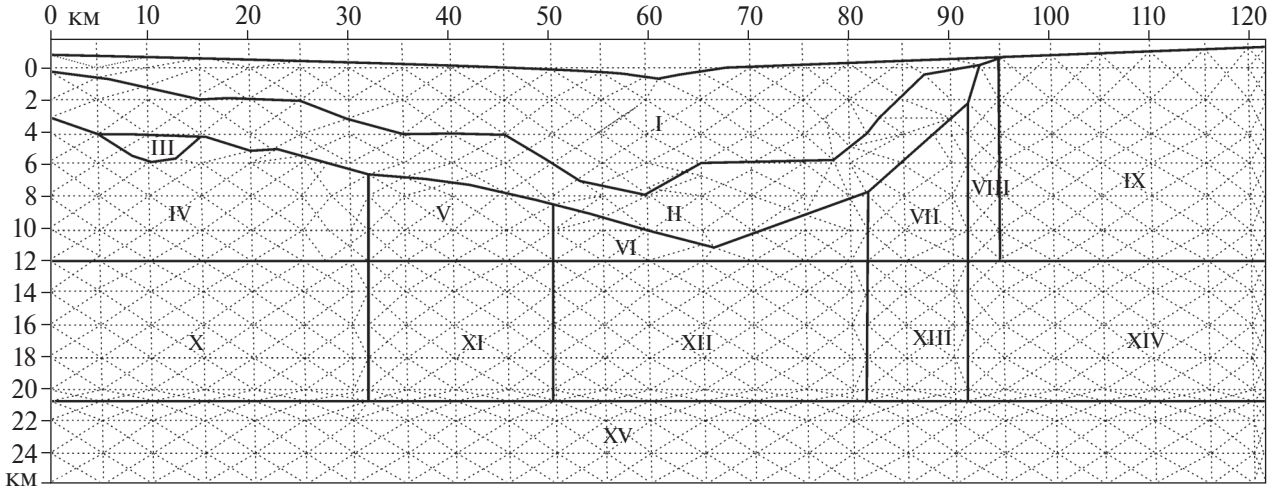


Рис. 3. Расчетная область для построения математической модели неоднородной тяжелой полосы.

ном краях математической модели рассматриваемого профиля. Для этого рассмотрим задачу упругого деформирования составляющей по глубине узкой призматической полосы, в предположении плоского обобщенного напряженного состояния земной коры Ферганской депрессии.

Математическое моделирование обобщенного напряженного состояния земной коры Ферганской депрессии

Постановка задачи деформирования упругой тяжелой полосы. В декартовой системе координат ось x_1, помещенную на дневную поверхность Земли, направим вдоль длинного ребра полосы, при этом ось x_2 направим вертикально вниз. Напряженное состояние упругой тяжелой полосы описывается уравнением Ламе относительно вектора перемещений:

$$\Delta\overline{U} + \frac{1}{(1-2\nu)}\,\mathrm{graddiv}\,\overline{U} = \overline{F}, \qquad (1)$$

где $\overline{U}$ – двумерный вектор с компонентами перемещений (u_1, u_2), Δ — двумерный оператор Лапласа, ν — коэффициент Пуассона, $F(0, \rho g h/G)$, ρ — плотность, g — ускорение свободного падения, h — глубина рассматриваемого профиля, G — модуль сдвига.

Плотность, модуль сдвига, коэффициент Пуассона для указанных блоков выбирается из таблицы, приведенной на рис. 4, которая была построена для литосферы Средней Азии [1, 7, 10, 13, 28].

Перемещения масштабируются относительно $h = 1000$ м, плотности блоков относительно $\rho = 2.5$ г/см^3 и напряжения относительно давления $p = \rho g L$, при $\rho = 2.5$ г/см^3, $L = 25$ км. Соотношение между компонентами перемещений, тензоры деформации ε_{ij} и напряжений σ_{ij} имеют обычно принятый вид в теории упругости:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right); \qquad (2)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda\theta\delta_{ij} + 2G\varepsilon_{ij}, \qquad (3)$$

где λ — постоянная Ламе, которая выражается через G и ν по формуле:

$$\lambda = \frac{2G\nu}{(1-2\nu)}. \qquad (4)$$

Деформация и перемещение тяжелой полосы при моделировании двустороннего сжатия. Исследуем деформацию и перемещение упругой тяжелой полосы при горизонтальном сжатии с двух сторон (см. рис. 5). Рассматриваемый профиль разделен на 15 однородных зон.

Граничные условия задавались следующим образом:

- на верхней части прямоугольника, соответствующей поверхности Земли, отсутствуют напряжения;
- на боковых границах горизонтальные перемещения, убывающие по глубине; нижняя граница допускает скольжение без трения.

Уравнение (1) решалось методом граничных интегральных уравнений, который описан подробно в [6].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследователями был проведен сравнительный анализ данных по нефтегазоносности Ферганской депрессии с позиции многоярусной тектоники, который дал возможность четко описать

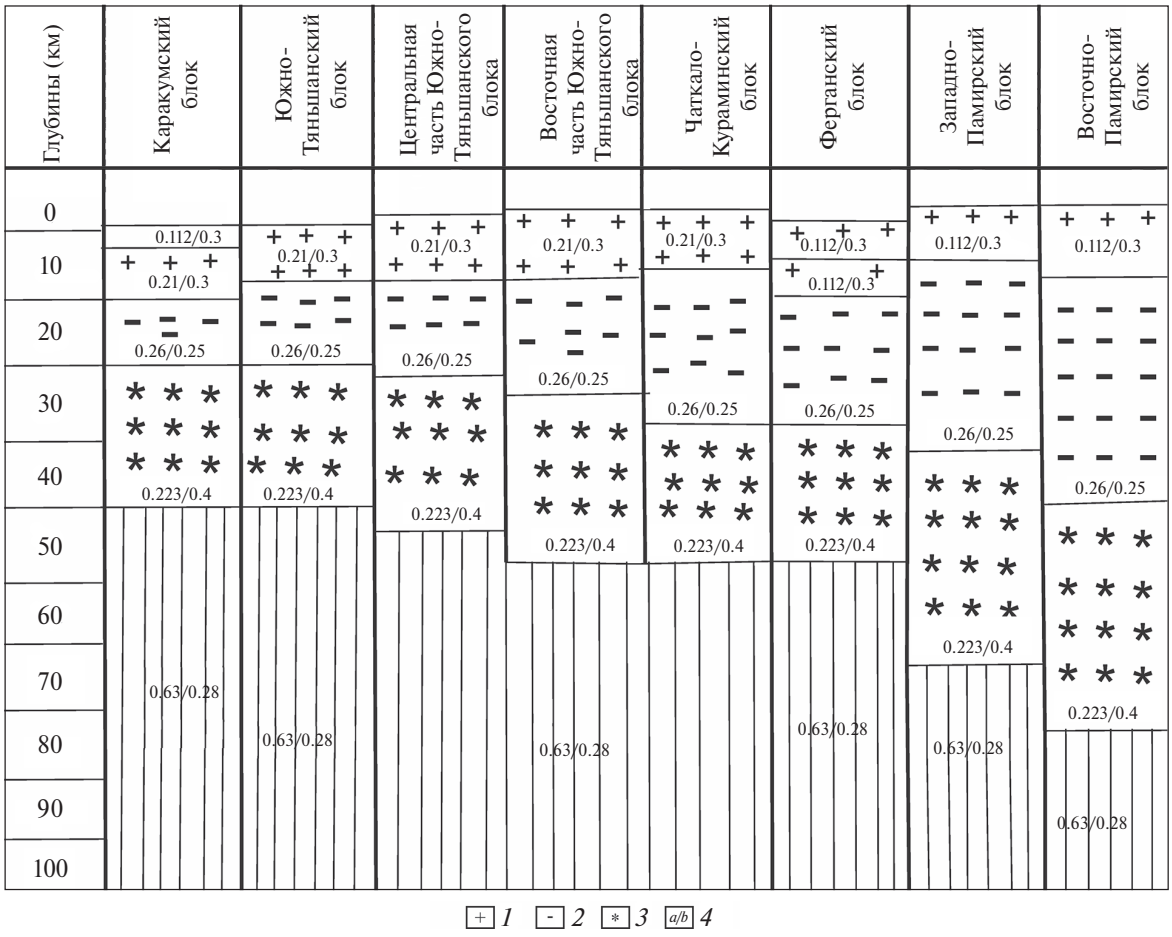


Рис. 4. Физические параметры литосферы Центральной Азии (по данным [1]).

1 — модуль сдвига (арабские цифры) в масштабе 10^{-11} Па/коэффициент Пуассона; *2* — палеозойский комплекс с границей кристаллического фундамента; *3* — граница Конрада; *4* — поверхность Мохо

геодинамический тип нефтегазоносного бассейна и уточнить его глубинную структуру [2, 18, 31, 35].

Проведение численных расчетов для подкрепления многоярусной тектоники очень важно для понимания геодинамики Ферганской впадины. В частности, необходимо согласовать сочетание взбросов (сжатие) и сбросов (растяжение) в центральной части депрессии. Картина расслоенной деформации, в отличие от обычного прогибания, имеет сложный вид (рис. 5).

Предлагаемая численная модель деформации границ раздела неоднородностей разработана нами с помощью математического моделирования напряженного состояния одного из продольных профилей, сжатого с боковых сторон (см. рис. 2). Верификация модели проведена на численном решении задачи о перемещений от собственного веса тестовой задачи для однородной полосы, закрепленной по боковым сторонам (рис. 6).

Небольшие искажения направления векторов вызваны особенностью метода граничных интегральных уравнений при численной реализации уравнения (1), эти искажения устраняются применением более высокой аппроксимации искомых данных. Представлены изолинии перемещений при боковом сжатии тяжелой полосы, состоящей из 15-ти зонально однородных областей (рис. 7).

На основе результатов численного решения тестовой задачи рассмотрим особенности напряженного состояния и деформации реальных профилей.

В соответствии с критерием фон Мизиса материал разрушается, когда энергия деформации на единицу объема деформируемого тела достигает значения энергии деформации на единицу объема за пределами упругости материала. Эта теория применима к пластическим средам и лучше всего работает для материалов, подвергающихся сдвигу. Во многих упругих средах максимальные касательные напряжения τ_{max} представляют большой интерес для исследования.

При достижении предела прочности по касательному напряжению возможны разрушения,

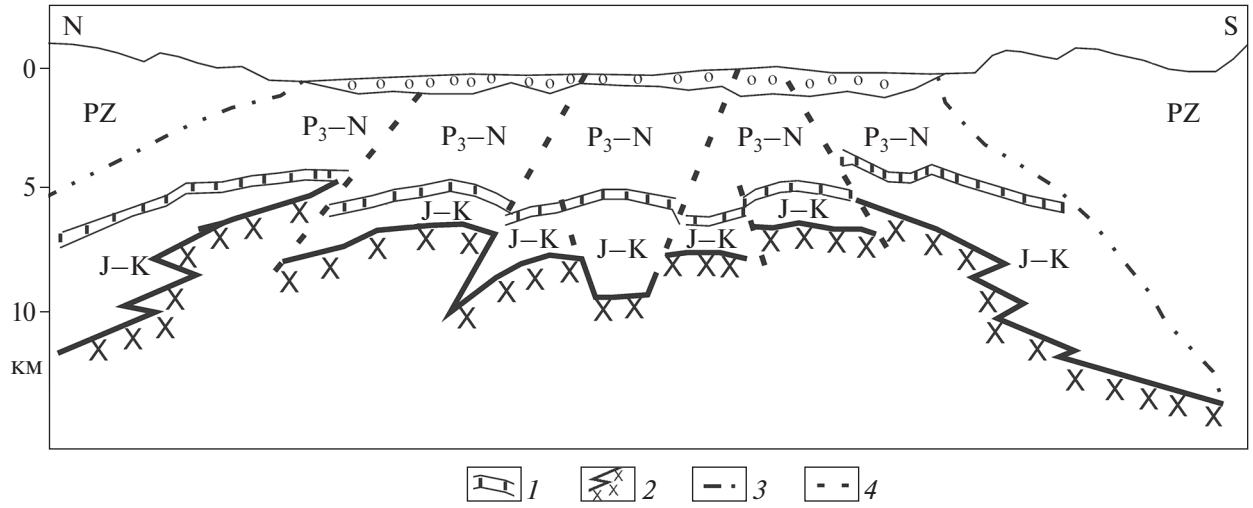


Рис. 5. Схема образования рифтовой долины Ферганского нефтегазоносного бассейна (по данным [18, 31, 35]). Отложения: PZ — палеозойские; P_3–N — олигоцен–неогеновые; J–K — юрско–меловые. *1* — палеогеновый нефтегазоносный комплекс; *2* — поверхность складчатого фундамента; *3–4* — нарушения: *3* — разрывные, *4* — олигоцен–четвертичные.

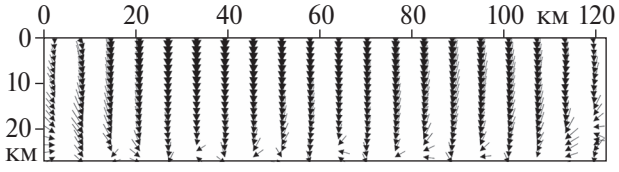


Рис. 6. Поле перемещений тяжелой однородной полосы, сжатой по боковым границам.

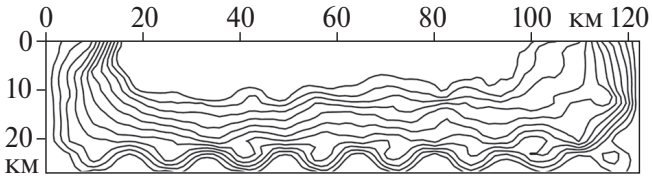


Рис. 7. Изолинии перемещений зонально неоднородной тяжелой полосы.

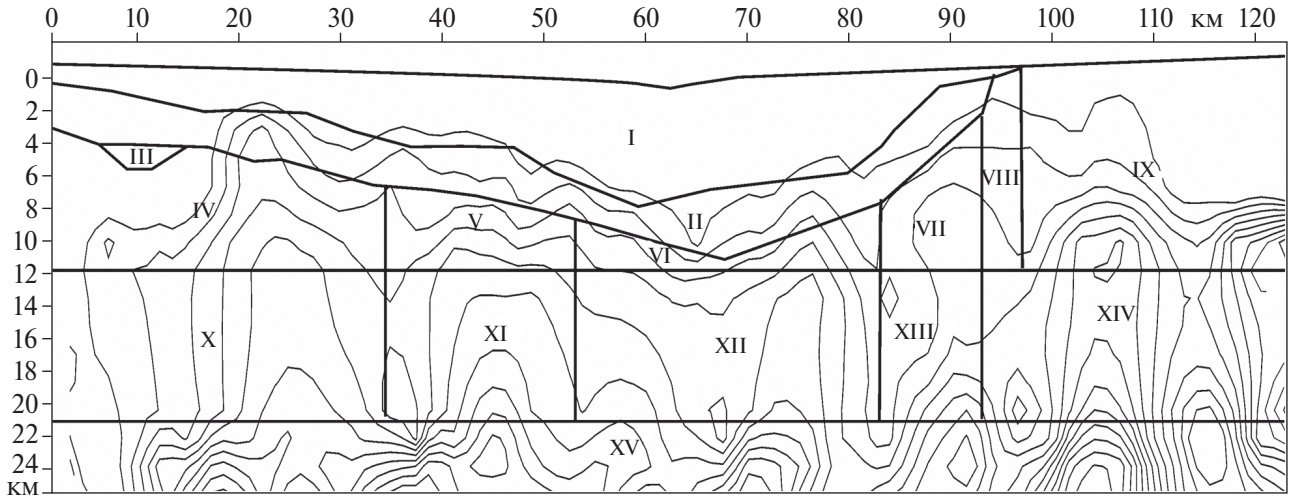


Рис. 8. Изолинии максимальных касательных напряжений неоднородной тяжелой полосы.

следствием которых являются землетрясения. Изолинии τ_{max}, полученные в наших расчетах, представлены на рис. 8. Картина изолинии показывает, что в большей части они оконтуривают границы плотностных неоднородностей и близлежащих им частей.

Показано перемещение границ раздела плотностей, заключенных в зонах IV–V, V–VI и VI–VII, (см. рис. 6, рис. 9).

Как следует из представленной картины, при принятых условиях первоначально вертикальные границы областей IV–V, V–VI и VI–VII наклоняются приблизительно так, как в гипотетической много-

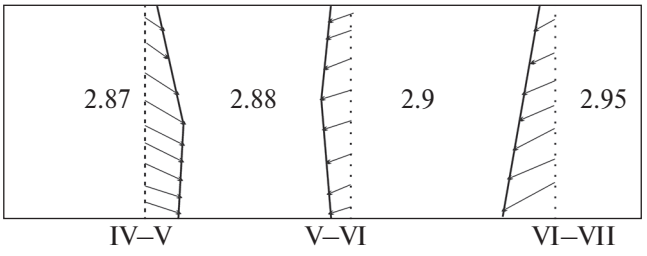


Рис. 9. Перемещения в крупном плане границ контакта зон IV–V, V–VI и VI–VII тестовой задачи о боковом сжатии зонально неоднородной тяжелой полосы.

Обозначено: плотности в г/см^3 (арабские цифры); границы контакта (линии) — до деформации (штриховые), после деформации (сплошные).

ярусной схеме (см. рис. 5). Одновременно получено, что очаги землетрясения находятся в непосредственной близости плотностных неоднородностей.

ВЫВОДЫ

1. Проведенное математическое моделирование позволило выявить геодинамические особенности Ферганской депрессии, которая находится в близмеридиональном сжатии и при этом имеет земную кору, характерную для рифта, которому свойственно растяжение.

2. Предварительно проведен анализ плотностных характеристик глубинных слоев и современных движений региона.

3. Численные результаты решения математической модели показали, что под действием горизонтальных тектонических напряжений вполне возможны сбросовые движения, предполагаемые многоярусной тектоникой. При этом решающую роль играет наличие зонально неоднородных плотностей земной коры.

Показано, что значения максимальных касательных напряжений находятся вблизи границ плотностных неоднородностей, что не совпадает с ранее определенными гипоцентрами землетрясений.

Благодарности. Авторы искренне признательны анонимным рецензентам за ценные советы и замечания и редактору М.Н. Шуплецовой (Геологический институт РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

Финансирование. Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования фундаментальных и прикладных исследований АН РУз.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абидов А.А., Атабеков И.У., Ходжиметов А.И.* Движущие силы складкообразования. — В сб.: “Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле”. — Под ред. О.А. Глико, Ю.Г. Леонова — М.: ИФЗ РАН, 2012. С. 69–72.
2. *Алексеев Н.А., Горячева И.Г., Добычин М.И.* О движении вещества в пограничном слое при трении твердых тел // Докл. АН СССР. 1989. Т. 304. № 1. С. 97–100.
3. *Арган Э.* Тектоника Азии. — Доклад на Брюссельской (XII) сессии Международного геологического конгресса в 1922 г. — М.–Л. : ОНТИ, 1935 (2018), 192 с.
4. *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
5. *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
6. *Атабеков И.У.* Опыт моделирования сейсмотектонического течения земной коры Центральной Азии // Физика Земли. 2021. № 1. С.122–132. https://doi.org/10.31857/S0002333721010014
7. *Бабаджанов Т.Л., Кунин Н.Я., Лук-Зильберман В.И.* Строение и нефтегазоносность глубокопогруженных комплексов Средней Азии по геофизическим данным. — Под ред. В.В. Белоусова/ — Ташкент: Фан, 1986. 190 с.
8. *Булин Н.К.* Современное поле напряжений в верхних горизонтах земной коры // Геотектоника. 1971. № 3. С. 3–15.
9. *Буртман В.С.* Тянь-Шань и Высокая Азия: Геодинамика в кайнозое. — Под ред. Ю.Г. Леонова. — М.: ГЕОС, 2012. 186 с. (Тр. ГИН РАН. Вып. 603).
10. *Долгополов Ф.Г.* Трехмерная физико-геологическая модель литосферы Среднеазиатского геодинамического полигона // Геология и минеральные ресурсы. 2004. № 5. С. 40–43.
11. *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.
12. Земная кора и верхняя мантия Средней Азии. — Ч.II. — Геофизические модели земной коры и верхней мантии Средней Азии. — Под ред. И.Х. Хамрабаева. — М.: Наука, 1977. С. 37–134.
13. *Зуннунов Ф.Х.* Литосфера Средней Азии по сейсмическим данным. Ташкент: Фан, 1985. 108 с.
14. *Ибрагимов Р.Н.* Сейсмогенные зоны Среднего Тянь-Шаня. — Под ред. Г.А. Мавлянова. –Ташкент: ФАН, 1978. 144 с.
15. *Ибрагимов Р.Н., Зияутдинов Ф.Ф., Садыков Ю.М., Ходжаев А.К.* Карта сейсмогенных зон Узбекистана. — М-б 1 : 1 600 000. — Специальная угловая врезка “Сей-

смическое районирование. –М-б 1:5 000 000". –Ташкент: Госкомземгеодезкадастр, 2011, 1 лист.
16. *Ибрагимов Р.Н., Садыков Ю.М., Кадыров Ш.М.. Рыжкова М.О., Ходжаев А.К.. Зияутдинов Ф.Ф.* Сейсмотектоника некоторых районов Узбекистана. — Под ред. О.М. Борисова. — Ташкент: ФАН, 1980. 148 с.
17. *Ибрагимов Р.Н., Садыков Ю.М., Ходжаев А.К., Нурматов У.А., Юсупжанова У.А.* Карта сейсмогенных зон Узбекистана и прилегающих территорий. — М-б 1 : 3 500 000. — В кн.: Сейсмологический атлас Узбекистана. — Ташкент: Госкомземгеодезкадастр, 2021. 59 с.
18. *Клещев К.А., Петров А.И., Шеин В.С.* Геодинамика и новые типы природных резервуаров нефти и газа. — М.: Недра, 1995. 284 с.
19. *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).
20. Литосфера Памира и Тянь-Шаня. — Ч. II. — Строение и энергетика литосферы Южного Тянь-Шаня и Памира по геофизическим данным. — Под ред. И.А. Фузайлова, Р.А. Мусина. — Ташкент: ФАН, 1977. С. 87–229.
21. *Милановский Е.Е., Никишин А.М.* Качественная модель механизма складчатости в рифтогенных впадинах // Докл. АН СССР. 1987. Т. 295. С. 171–176.
22. *Мордвинцев Д.О.* Особенности глубинного строения Ферганской впадины и их связь с размещением месторождений нефти и газа. — Мат-лы Всерос. конф. "Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ: углеводороды и жизнь". Москва 18–23 окт. 2010 г. — М.: 2010, ИПНГ РАН. С. 361–364.
23. *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.
24. *Мордвинцев Д.О.* Новые взгляды на глубинное геологическое строение Ферганской впадины по геофизическим данным. Особенности рельефа структурной поверхности домезозойских образований // Геология и минеральные ресурсы. 2012. № 4. С. 55–60.
25. *Мордвинцев О.Д.* Геологическое строение домезозойских комплексов Ферганской впадины по геофизическим дным. — Дис. ... д.г-м.н. –Ташкент: ИС АНРУз, 2020. 201с.
26. *Пешкова Н.Н.* Возможная модель строения Ферганской межгорной впадины // Докл. АН СССР. Т. 355. № 2. С. 230–234.
27. *Садыков Ю.М., Нурматов У.А., Шукуров З.* Карта активных разломов Западного Тянь-Шаня. — М-б 1 : 1 600 000. — В кн.: Сейсмологический атлас Узбекистана. –Ташкент. Госкомземгеодезкадастр, 2021. 79 с.
28. *Таль-Вирский Б.Б.* Геофизические поля и тектоника Средней Азии. — М.: Недра, 1982. 271 с.
29. *Цубои Т.* Энергия землетрясений, объем гипоцентральной области, площадь афтершоков, прочность Земной коры. — В сб.: Слабые землетрясения. — Под ред. Ю.В. Ризниченко — М.: ИЛ, 1961. С. 160–164.
30. *Цубои Т.* Гравитационное поле Земли. М.: Мир, 1982. 288 с.
31. *Яблонская Н.А.* Тектоническая структура Южного Тянь-Шаня и этапы ее формирования // Геотетоника. 1989. № 1. С. 61–71.
32. *Якубов Д.Х.* Геотектонические условия возникновения сильных землетрясений Срединного и Южного-Тянь-Шаня. — Под ред. О.М. Борисова. — Ташкент: ФАН, 1991. 104 с.
33. *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.
34. *Deformation of the Continental Crust: The Legacy of Mike Coward*. — Ed. by A.C. Ries, R.W.H. Butler, R.H. Graham, (Geol. Soc. London, Spec. Publ. 2007. Is.272), 449 p. Doi: doi.org/10.1144/gsl.sp.2007.272.01.0
35. *Khain V.E., Sokolov B.A., Khleshov K.A., Shein V.S.* Tectonic and geodynamic setting of oil and gas basins of the Soviet Union // AAPG Bull. 1991. Vol. 75. No. 2. P. 313–325.
Doi: 10.1306/0c9b27bd-1710-11d7-8645000102c1865d
36. *Thomas J.C., Cobbold P.R., Shein V.S., Le Douaran S.* Sedimentary record of Late Paleozoic to recent tectonism in Central Asia — analysis of subsurface data from the Turan and South Kazak domains // Tectonophysics. 1999. Vol. 313. P. 243–263.
37. *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.

The Layered Tectonics and Mathematical Modeling of Geodynamic Setting of the Fergana Depression (Uzbekistan)

I. U. Atabekov[1,*], Yu. M. Sadykov[1], J. K. Mamarakhimov[1]

[1] *Mavlyanov Institute of Seismology, Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan, bld. 3, str. Zulfiyakhanum, 100028 Tashkent, Uzbekistan*

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

The geodynamic features of the Fergana intermountain depression are the presence of a rift during meridional compression of the region and the discrepancy between the location of earthquake sources and the boundaries of heterogeneities in the layers of the earth's crust. The first feature is solved using the ideas of multi-stage plate tectonics, which provides an additional opportunity to assess the oil and gas content of the basin. However, existing hypothetical tectonic schemes are not supported by mathematical calculations. To clarify these features, we have developed a mathematical model of the stress-strain state in relation to one of the cross sections of the Earth's crust in the Fergana depression, which has a zonally inhomogeneous density structure. The results of the mathematical model show that the presence of blocks of different densities creates displacements under the influence of horizontal compressive stresses. It is also shown that the isolines of maximum tangential stresses are located close to the boundaries of inhomogeneous zones, which indicates the presence of large errors in determining earthquake hypocenters.

Keywords: multi-stage tectonics, geodynamics, seismicity, deep structures, active faults, modern movements, mathematical modeling