

**DEFORMATION REGIMES AND LOW-RANK PALEOTECTONIC STRESSES
OF THE WESTERN TIAN SHAN IN THE MESOZOIC – CENOZOIC**R.A. Umurzakov  

Islam Karimov Tashkent State Technical University, 2 Universitetskaya St, Tashkent 100095, Uzbekistan

ABSTRACT. There is a description of the results of studies of deformation regimes and reconstruction of stress fields of certain time intervals of the Mesozoic – Cenozoic history of the western part of the Tien Shan based on the geological and structural data and earthquake focal mechanisms. The relevance of research is determined by the existing difficulties in the age reference of paleostress fields, which is associated with the retrospective nature of the initial data and the features of geological evolution, as well as the existence of controversial, unresolved issues regarding the development of the western periclinal part of the Tien Shan in the Mesozoic – Cenozoic. The aim of the research is to reconstruct the rank components of paleostresses in the earth's crust in the western part of the Tien Shan at separate stages of the Mesozoic – Cenozoic development. The time intervals for which the stress field diagrams were obtained represent cyclically manifested phases of the first-rank rhythms, which are characterized by alternation of different deformation modes. The method for reconstructing paleostresses was based on the concept of the formation of superimposed systems of cracks of various generations, which were sequentially manifested at various stages of the development of deformation processes. Analysis of the data showed that with increasing age of rocks the number of different fracture systems actually increases – the earlier systems are superimposed by the later. At the same time, the characteristic elements in Quaternary rocks manifest themselves in different ways in the older rocks. This allows them to be used for the reconstruction of the Late Cenozoic stress field based on mass measurements of fracturing in rocks of earlier Mesozoic – Cenozoic ages. Based on the step-by-step identification of the heterochronous cracks system and determination of a pair of maxima of the fracture density with asymmetric scattering, region-based diagrams of the first-rank stress fields were obtained for different stages of manifestation of Mesozoic – Cenozoic deformation regimes: 1 – from the Permian-Triassic to the Middle Jurassic; 2 – Middle-Late Jurassic; 3 – Late Jurassic – Early Cretaceous; 4 – Late Cretaceous – Paleocene – Eocene; 5 – Oligocene – Quaternary. The results obtained indicate the alternation of compression and extension phases, first-rank for the region, and give an idea of the main trends in its geodynamic evolution. They can be used in the development of a tectodynamic model of the region.

KEYWORDS: crack systems; deformation stages; paleostress rank components; paleostress reconstruction technique; Mesozoic – Cenozoic; compression; extension; tectodynamic system

FUNDING: Not specified.

**RESEARCH ARTICLE**

Correspondence: Rakhimjan A. Umurzakov, umruzok54@gmail.com

Received: January 11, 2022

Revised: May 11, 2022

Accepted: August 10, 2022

FOR CITATION: Umurzakov R.A., 2023. Deformation Regimes and Low-Rank Paleotectonic Stresses of the Western Tian Shan in the Mesozoic – Cenozoic. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (1), 0687. doi:10.5800/GT-2023-14-1-0687

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ И ПАЛЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НИЗШЕГО РАНГА ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТЯНЬ-ШАНЯ В МЕЗОЗОЕ – КАЙНОЗОЕ

Р.А. Умурзаков

Ташкентский государственный технический университет им. И. Каримова, 100095, Ташкент, ул. Университетская, 2, Узбекистан

АННОТАЦИЯ. Приводится описание результатов исследований деформационных режимов и реконструкции полей напряжений отдельных временных интервалов мезозойско-кайнозойской истории западной части Тянь-Шаня по геолого-структурным данным и механизмам очагов землетрясений. Актуальность исследований определяется имеющимися трудностями возрастной привязки полей палеонапряжений, что связано с ретроспективным характером исходных данных и особенностями геологической эволюции, а также существованием дискуссионных, нерешенных вопросов относительно развития западной периклинальной части Тянь-Шаня в мезозое – кайнозое. Целью исследований является реконструкция ранговых составляющих палеонапряжений в земной коре западной части Тянь-Шаня в отдельные этапы мезозой-кайнозойского развития. Временные интервалы, для которых получены диаграммы полей напряжений, представляют собой циклически проявляющиеся фазы ритмов первого ранга, для которых характерно чередование режимов тектонических движений и деформаций. Основу метода реконструкции палеонапряжений составили представления о формировании наложенных систем трещин различных генераций, последовательно проявленных в различные этапы развития деформационных процессов. Анализ данных показал, что с увеличением возраста горной породы действительно увеличивается число различных систем трещин – на более ранние накладываются более поздние. При этом характерные элементы в четвертичных породах отмечаются с той или иной выраженностью в породах и более ранних возрастов. Это позволяет использовать их для реконструкции позднекайнозойского поля напряжений на основе массовых измерений трещиноватости в породах более ранних возрастов мезозоя – кайнозоя. На основе поэтапного выделения разновозрастной системы трещин и определения пары максимумов с асимметричным разбросом получены диаграммы общерегиональных полей напряжений первого ранга для различных этапов проявления деформационных режимов мезозоя – кайнозоя: 1 – от пермотриаса до средней юры; 2 – средняя – поздняя юра; 3 – поздняя юра – ранний мел; 4 – поздний мел – палеоцен – эоцен; 5 – олигоцен – четвертичный период. Полученные результаты свидетельствуют о чередовании фаз «сжатия» и «растяжения» первого для данного региона ранга и дают представление об основных тенденциях геодинамической эволюции региона. Они могут быть использованы при разработке тектонодинамической модели региона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система трещин; этапы деформации; ранговые составляющие палеонапряжений; методика реконструкции палеонапряжений; мезозой – кайнозой; сжатие; растяжение; тектонодинамическая система

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Не указано.

1. ВВЕДЕНИЕ

Знания о деформационных режимах и полях напряжений геологического прошлого необходимы не только для понимания современных геодинамических процессов, но и для изучения механизмов формирования палеотектонических структур и условий формирования месторождений полезных ископаемых [Gzovsky, 1975; Sherman, Dneprovsky, 1989]. Актуальность исследований по данной теме имеет два аспекта: первый связан с необходимостью решения региональных геологических задач изучаемой территории, второй – с неудовлетворительным состоянием разработанности методов реконструкции палеотектонических напряжений различных этапов геологического развития регионов.

Строение изучаемой территории анализировалось с различных точек зрения согласно развитию соответствующих тектонических концепций: геосинклинальной, плитотектонической, разломно-блоковой, тектоники плюмов и других, поэтому здесь нет единства

мнений не только о положении разломов, составляющих своеобразный каркас структуры региона, но и о их возрасте и активности в различные интервалы времени [Lordkipanidze, Tsai, 2017]. Тектоника региона представляется весьма сложной картиной наложения различных по природе и масштабам геодинамических процессов, которые характеризуются разными деформационными режимами и тектоническими напряжениями с соответствующей длительностью действия. В связи с этим единственно верным является детальное изучение их особенностей в различные этапы развития региона с выделением их разноранговых составляющих. Исходя из этого, цель настоящих исследований – выделение временных интервалов и типов различных деформационных режимов и полей напряжений низшей (первой для данного региона) ранговой составляющей палеонапряжений в мезозойско-кайнозойское время. Для этого были выполнены исследования по оценке длительности проявления тектонодинамических систем разного ранга, сбор и обработка

полевых геолого-структурных материалов по трещинной деформации и кинематике для реконструкции палеотектонических напряжений различных временных интервалов.

2. СВЕДЕНИЯ О ТЕКТОНИКЕ И ГЕОДИНАМИКЕ РЕГИОНА

Для исследуемого региона характерно проявление обширной зоны контакта двух областей с различным геотектоническим режимом (рис. 1) – восточной части Туранской платформы и западной погружаемой части Тянь-Шаня. Сюда входят западные окончания

Туркестанского, Гиссарского, Зарафшанского горных поднятий, к западу от них по простиранию – Нурагинское, Зирабулак-Зиаэтинское и Центрально-Кызылкумское поднятия. Основные палеозойские структурные элементы, именуемые Южным Тянь-Шанем, имеют субширотное простирание. Часть рассматриваемой территории включает западный и северо-западный фрагменты Срединно-Тянь-Шаньской мезоплиты [Dzhamalov et al., 2016]. Описанные в этой работе палеотрансформные разломы северо-восточного простирания имеют герцинское заложение. Одним из них является Западно-Тянь-Шаньский. О.М. Борисовым

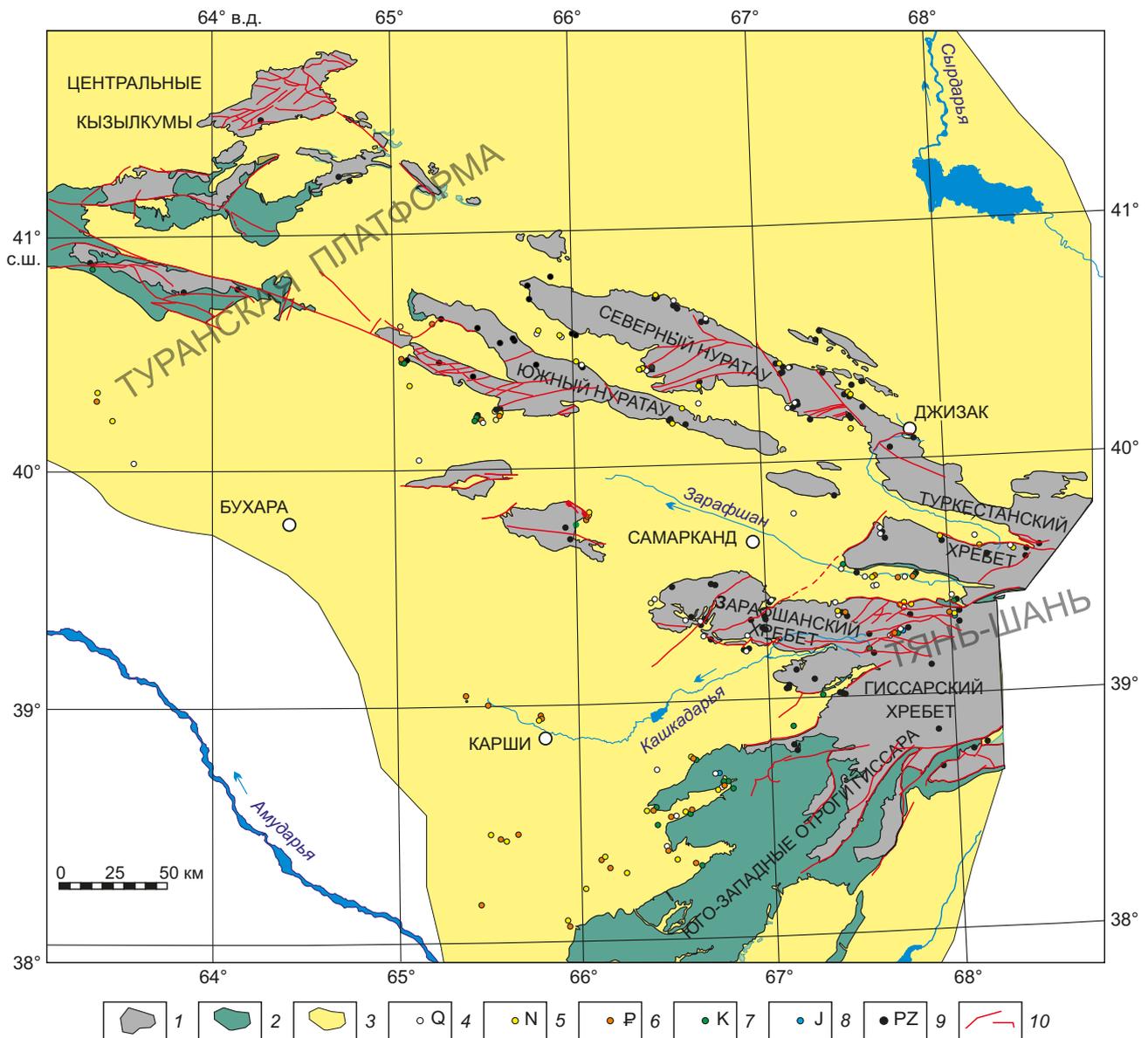


Рис. 1. Обзорная карта-схема территории западной части Тянь-Шаня с элементами геологии. 1-3 – стратиграфические комплексы: 1 – палеозоя, 2 – мезозоя, 3 – кайнозоя; 4-9 – пункты полевых наблюдений в разновозрастных обнажениях горных пород: 4 – четвертичных, 5 – неогеновых, 6 – палеогеновых, 7 – меловых, 8 – юрских, 9 – палеозойских; 10 – разрывные нарушения, нашедшие отражение в геологических картах.

Fig. 1. A schematic map of the territory of the western part of the Tien Shan with elements of geology. 1-3 – stratigraphic complexes: 1 – Paleozoic, 2 – Mesozoic, 3 – Cenozoic; 4-9 – field observation points in heterochronous rock outcrops: 4 – Quaternary, 5 – Neogene, 6 – Paleogene, 7 – Cretaceous, 8 – Jurassic, 9 – Paleozoic; 10 – faults reflected in geological maps.

[Borisov, 1982], М.А. Ахмеджановым [Akhmedzhanov, Borisov, 1977] и другими исследователями в описываемом регионе выделены две системы структур: молодые, северо-восточного простирания мезозой-кайнозойского возраста; северо-западные и субмеридиональные, выраженные и в палеозойских, и в мезозой-кайнозойских образованиях.

Имеются разные мнения относительно новейшей тектоники региона: о границе между орогеном и платформой, о наличии или отсутствии переходной области от орогена к платформе, о соотношении продольных и поперечных разрывных нарушений и др. В последние десятилетия появились новые взгляды на историю развития региона, основанные на «открытиях» и «заккрытиях» палеоокеанических бассейнов, с которыми связывается геодинамика региона [Dalimov, Troitsky, 2005]. В структуре региона наблюдаются линейные узкие депрессии, выполненные платформенными отложениями юры – эоцена и альпийской молассой неоген-четвертичного возраста. Они представляются в качестве шовных зон и отнесены к типам структур, которые являются следствием возникновения «зон концентрированной деформации» [Leonov et al., 2018].

Отмечается также, что в геологических основах для поисково-разведочных работ отсутствуют описания элементов «структурных парагенезисов, что препятствует объективной оценке геодинамической обстановки для прогноза перспективных участков» [Omonov et al., 2016, с. 23]. Нет единого мнения и при классификации складчатых структур более ранних этапов деформации [Omonov et al., 2016], поэтому актуально широкое изучение складок, кливажей линейности, слоистости, зоны вязких разломов, что входит в задачи тектонофизических исследований.

Особенности неотектоники отдельных участков изучались: А.А. Юрьевым и др. – Бухаро-Хивинский регион; А.Х. Нугмановым, Н.И. Николаевым, Б.Б. Ситдиковым и др. – Центральные Кызылкумы. Отдельные аспекты геодинамики домезозойского времени рассматривались Р.Х. Миркамаловым. По данной территории требуется обобщение материалов на основе тектонофизического анализа деформаций, изучения особенностей полей напряжений, соотношения их ранговых составляющих. С учетом сложности и значительного объема таких исследований в настоящей работе приводится описание первого этапа исследований – определения общих закономерностей перестройки региональной (низшей) ранговой составляющей деформаций и напряжений региона в мезозое – кайнозое.

3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ПАЛЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

При изучении полей напряжений различных этапов развития изучаемых регионов по геолого-структурным данным наиболее широко используются структурно-парагенетические и кинематические методы.

Известны результаты применения их в различных регионах: на территории России [Sherman, 2012; Sim, 2013; Seminsky, 2014; Rebetsky, 2015; Sankov et al., 2017], Монголии [Parfeevets, Sankov, 2018], Украины [Bubniak et al., 2013; Gintov, 2005; Gintov et al., 2013], Кыргызстана [Kalmet'eva et al., 2019] и др. При реконструкциях докайнозойских, кайнозойских и современных полей напряжений в пределах Иркутского амфитеатра [Sankov et al., 2017] использованы данные о складчатых и разрывных деформациях территории. Исследования авторов данной статьи также опирались на геолого-структурные материалы, использованы данные статистического анализа трещин с учетом кинематических данных, а также данные о механизмах очагов землетрясений. Определение общерегионального поля напряжений проводилось по методике [Nikolaev, 1992] – с выделением тектонодинамических систем разного ранга. При этом «ранг» системы является показателем обретенного объектом свойств целостности – однородности напряженного состояния, которая не всегда определяется масштабом деформируемого объема и поэтому «ранг» представляется как объединение терминов «порядок» и «ранг» (в масштабном понимании), принятое при описании «методики спецкартирования» [Seminsky, 2014].

Оценка современного поля напряжений выполнена на основе данных механизмов очагов землетрясений с выделением асимметричных разбросов нодальных поверхностей по методике [Nikolaev, 1992, с. 63]. В анализе использовано около 200 определений механизмов очагов землетрясений. Анализ сводных диаграмм полей напряжений, полученных для разных глубинных интервалов, показывает, что с глубиной меняется тип поля напряжений: в верхней части (0–10 км) – сбросовое, в средней части (10–20 км) – взбросовое, в нижней части (свыше 22 км) – сдвиговое. Эти результаты подтвердили проявление здесь (на рассматриваемом масштабном уровне) полей напряжений тектонодинамических систем трех рангов [Umurzakov, 2012].

Для определения временных интервалов деформационных режимов тектонодинамических систем в мезозое – кайнозое был выполнен ритмохронологический анализ изменчивости литологического состава отложений разреза по 70 скважинам, распределенным по региону. В целом было выделено три ритма первого, 19 ритмов второго и большое число третьего ранга. При этом каждый ритм включает фазу поднятий («активные») и фазу опусканий («пассивные») (рис. 2).

Начальная фаза первого ритма I ранга предположительно отнесена к пермотриасу. Вслед за крупным перерывом в осадконакоплении следует резкая активизация (перестройка структурного плана) (рис. 2, фаза R_1^1). В большей части территории отложения J несогласно залегают на эродированной поверхности палеозоя.

Отложения J_{1-2} представлены красными и пестроцветными песчаниками, глинами, мелкогалечными

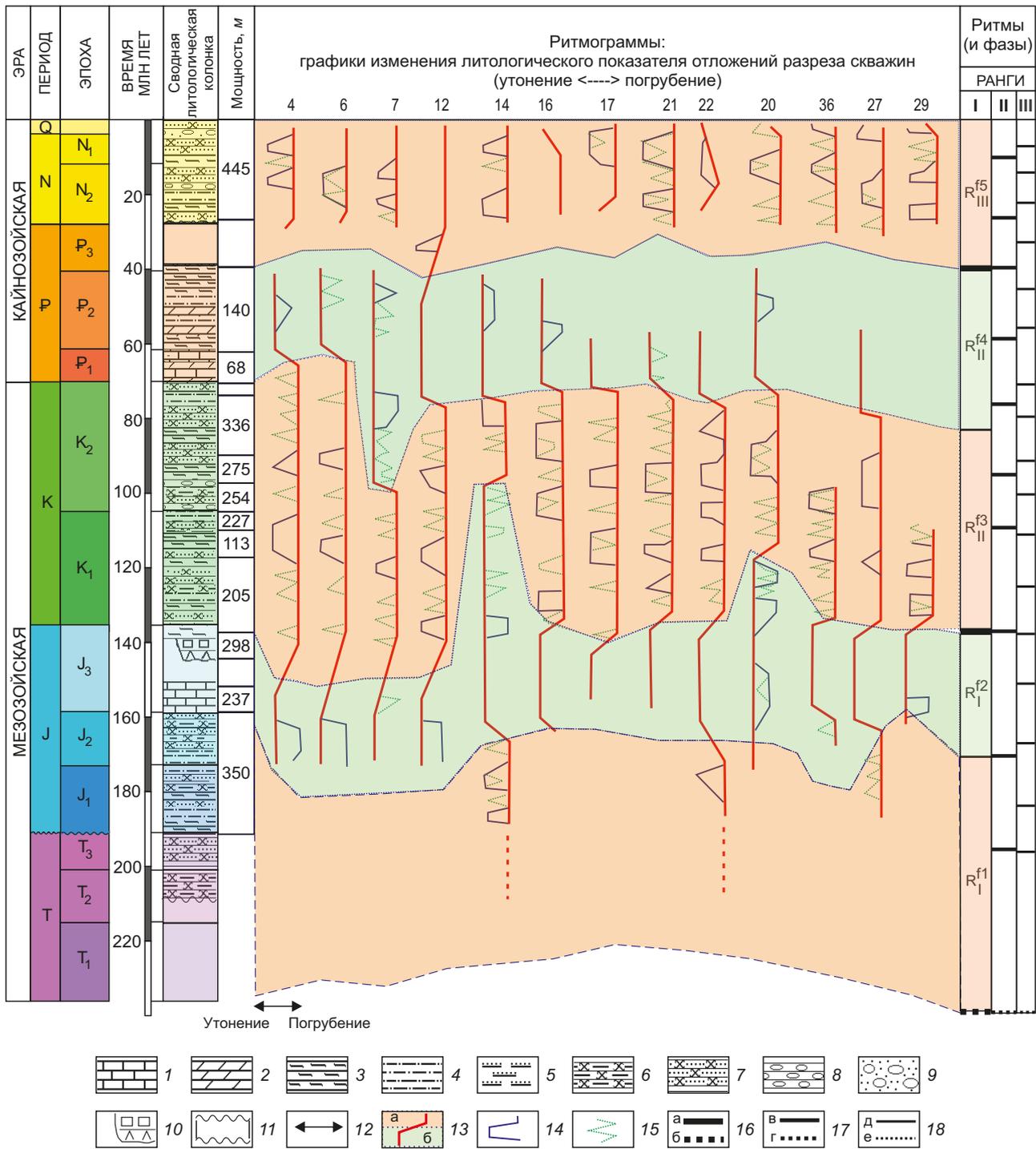


Рис. 2. Проявление деформационных режимов разного ранга в западной части Тянь-Шаня в мезозое – кайнозое. 1 – известняк; 2 – глина; 3 – мергель; 4 – алевролит; 5 – глинистый песчаник (с преобладанием глин); 6 – песчаник глинистый (с преобладанием песчаника); 7 – песчаник; 8 – конгломерат; 9 – конглобрекчия; 10 – соляно-ангидритовая толща; 11 – пере­рывы в осадконакоплении; 12 – в графиках: направление изменения литологии пород: влево – утонение, вправо – по­г­ру­бе­ние; 13–15 – ритмограммы: 13 – I ранга: а – «активная» фаза, б – «пассивная» фаза, 14 – II ранга, 15 – III ранга; 16–18 – границы начала ритмов (фазы воздымания): 16 – I ранга: а – установленные, б – предполагаемые, 17 – II ранга: в – установленные, г – предполагаемые, 18 – III ранга: д – установленные, е – предполагаемые.

Fig. 2. Manifestation of different-rank deformation regimes in the western part of the Tien Shan in the MZ – CZ. 1 – limestone; 2 – clay; 3 – marl; 4 – siltstone; 5 – clayey sandstone (dominated by clay); 6 – clayey sandstone (dominated by sand); 7 – sandstone; 8 – conglomerate; 9 – conglobreccia; 10 – salt-anhydrite strata; 11 – breaks in sedimentation; 12 – the graphs show the direction of change in the lithological composition of rocks: thinning to the left and coarsening to the right; 13–15 – rhythmograms: 13 – first rank: a – "active" phase, б – "passive" phase; 14 – II rank; 15 – III rank; 16–18 – boundaries of the beginning of rhythms (phase of uplifting): 16 – I rank: а – established, б – assumed, 17 – II rank: в – established, г – assumed, 18 – III rank: д – established, е – assumed.

конгломератами с линзами и прослоями углей. Мощность их до 1300 м [Babaev et al., 1990]. Выше по разрезу наблюдается «пассивная» фаза (рис. 2, R_1^2), представленная карбонатными отложениями келловей-оксфорда. Их мощность колеблется от 0–200 (Бухарская ступень) до 300–600 м (Чарджоуская ступень) [Babaev et al., 1990].

Отрезку времени от конца келловей-оксфорда – начала киммеридж-титона J_3 до конца эоцена – начала олигоцена соответствует второй ритм (рис. 2, фазы R_{II}^1 и R_{II}^2) I ранга. Начальной стадии соответствует перерыв в осадконакоплении, за которым следует мощная толща соляно-ангидритовых образований [Babaev et al., 1990]. Выше по разрезу наблюдается толща красноцветных песчано-алевролитовых образований. Их общая мощность меняется от 350–400 до 1000 м (юго-западные отроги Гиссара), а в пределах Бухарской ступени колеблется от 140 до 410 м [Babaev et al., 1990]. «Пассивной» фазе второго ритма I ранга соответствуют терригенно-глауконитовая, лагунная и карбонатно-терригенная толщи, объединяющие отложения от апта до эоцена включительно. Они представлены переслаиванием песков, песчаников, алевролитов, глин, ракушечников, доломитов, известняков и конгломератов [Babaev et al., 1990]. Начало третьего ритма I ранга (рис. 2, фаза R_{III}^1) приходится на границу эоцена – олигоцена. Данный ритм незавершенный и представлен отложениями начальной стадии: средним и верхним слоями олигоцена (нижнесарбатьерская свита) – пачкой пестроцветных тонкопереслаивающихся глин [Yuryev, Umarov, 1971], на них залегают тонкослоистые желтые песчаники, переслаивающиеся с розовыми алевролитами и песчанистыми глинами мощностью 2–12 м. Выше по разрезу залегают континентальные образования неоген-четвертичного возраста: красно-бурые, кирпично-красные глины, алевролиты, песчаники, конгломераты, гравелиты, песчаники, пески, лессовидные суглинки. Мощность их увеличивается с запада на восток от нескольких десятков и сотен метров до 1000–2500 м и более [Yuryev, Umarov, 1971; Sitdikov, 1985].

Как видно из краткого описания, на уровне первой ранговой составляющей наблюдаются крупные интервалы чередования двух основных режимов тектонического развития, которые, по сути, можно назвать «континентальными» и «морскими» – отмечается чередование деформационных режимов «поднятий» и «опусканий». Таким образом, в мезозое – кайнозое выделены три ритма I ранга и соответствующие им пять фаз поднятий и опусканий (рис. 2). Для этих интервалов были выполнены реконструкции палеотектонических напряжений. Для выделения полей напряжений разных этапов деформирования используется методика П.Н. Николаева, основанная на выявлении сопряженных пар систем сколов с асимметричным разбросом от модальной поверхности [Nikolaev, 1977, 1992]. Наблюдаемые смещения максимума трещин в сторону оси максимального девиаторного сжатия при наличии

большого разброса соответствуют критерию прочности теории Кулона – Мора и отвечают результатам экспериментальных наблюдений над образцами горных пород [Rebetsky et al., 2017]. Это обстоятельство позволяет использовать методику для выделения ранговых составляющих, оценки относительно однородных объемов, в которых действуют поля напряжений. Следует отметить, что при статистическом анализе ориентировок трещин с поэтапной генерализацией как в случаях локальных объемов, так и для сводных данных на региональных уровнях помимо двух максимумов с асимметричным разбросом во многих диаграммах отмечается дополнительный максимум без определенного разброса. Возможно, именно такое проявление максимумов было названо тройственным парагенезом трещинных систем, положенным в основу методики «спецкартирования» [Seminsky, 2005]. Этот вопрос требует специального изучения и в данной работе пока не рассматривается.

Возможность изучения последовательности накладывающихся друг на друга деформаций горных пород на основе комплексирования тектонофизических методов в сочетании с данными стратиграфии и петрологии рассмотрена в работе [Gintov et al., 2013]. При этом использованы два класса методов: кинематический и структурных парагенезов. Были получены геохронологические шкалы деформационных процессов [Gintov et al., 2013]. Для выяснения возраста тектонических зеркал скольжения они сопоставлялись с ориентировками неоген-четвертичных разрывов и нодальными плоскостями механизмов очагов землетрясений. Авторы выделили для территории Горного Крыма более 60 однородно деформированных («оптимизированных») объемов в породах таврической серии средней и верхней юры, мела, палеогена и неогена [Gintov et al., 2013]. Восстановленные поля напряжений отнесены к альпийскому этапу орогенеза и представлены сдвиговым, сбросовым или взбросовым типом. Следует отметить, что при более строгом подходе к вопросу об оценке возраста поля напряжений остается неясным: какие признаки легли в основу определения возрастных интервалов «обобщенных полей напряжений», отражающих эволюцию земной коры региона в альпийском тектоническом цикле. Это относится и к другим методам, которые используют кинематические данные древних структур. Это связано с трудностями оценки возраста смещений по остаточным следам на плоскостях трещин от ранних этапов деформаций, например мелового или юрского времени, поэтому предпочтительнее методы, основанные на использовании данных о структурных парагенезах в случаях, когда установлен их возраст. Дальнейшее изложение материала касается последовательных этапов реализации использованной в настоящей работе методики: сбора, обработки полевых данных, реконструкции полей напряжений для выделенных интервалов проявления деформационных режимов. Для этого нами были собраны данные о статистике трещин по

Таблица 1. Данные по статистике пунктов наблюдений массовых замеров трещин
Table 1. Statistical data on the sites of mass measurements of cracks

Возраст пород	Нурата-Кызылкум	Туркестан-Зарафшан – Гиссар	ЮЗ отроги Гиссара	Всего
KZ	37	64	38	139
в т.ч. Q	14	27	9	50
N	16	21	14	51
Pg	7	16	15	38
MZ	8	19	17	44
в т.ч. K	8	15	11	34
J	–	4	6	10
T	–	–	–	0
PZ	62	96	12	170
Всего	107	179	67	353

отдельным регионам: Нурата-Кызылкумскому, Туркестано-Зарафшанскому, Гиссару и его юго-западным отрогам. Общее распределение пунктов наблюдений по площади приводится на [рис. 1](#), а количественное соотношение пунктов наблюдений по регионам и возрастным интервалам горных пород – в [табл. 1](#). При выполнении полевых исследований основной целью было выделение таких особенностей проявления трещин, которые бы имели наиболее общее региональное распространение.

На первом этапе для всех пунктов наблюдений выполнялись расчеты плотности распределения трещин на прямоугольных матрицах с выделением максимумов. На матрицу наносятся элементы падений трещин, замеренных в пункте наблюдения (до 100 замеров). Производится расчет плотности трещин, и определяются максимумы. На втором этапе максимумы плотностей трещин по каждому пункту наблюдений наносятся на сводную матрицу по каждой возрастной группе горных пород и отдельно по региональным структурам и для них определяются максимумы с асимметричным разбросом. Использование этих максимумов позволяет принять возраст поля напряжений низшего ранга как позднекайнозойский, соответствующий наиболее позднему этапу деформации – позднекайнозойскому времени. Обоснованием этому служит совпадение результатов реконструкций по геолого-структурным данным с результатами реконструкций по сводным данным механизмов очагов землетрясений, о которых речь пойдет ниже.

Для реконструкции палеотектонических напряжений более ранних этапов было выполнено выделение элементов (плотности трещин) предшествующих деформаций путем последовательного отсева из наложенной их совокупности, отмеченной в породах старшего возраста. Эта процедура была названа «последовательным отсевом наложенной трещиноватости» [Umurzakov, 2012]. Основой этому послужили, прежде всего, представления о закономерностях проявления трещин, отмеченные в работах М.В. Раца, С.Н. Чернышёва

и др. В работе [Chernyshev, 1983] было показано, что трещины в массиве горных пород состоят из нескольких систем, каждую из которых можно рассматривать как отдельную генерацию, а выявить закономерности строения сети трещин можно путем изучения особенностей их последовательных генераций. Исходя из этого, анализ особенностей пространственной ориентации плотности трещин выполнен в две стадии: отдельно для горных пород разного возраста, затем с выделением особенностей в различных возрастных интервалах мезозоя – кайнозоя. На каждой из этих двух стадий выполнялись построения диаграмм ориентировок осей напряжений для соответствующих возрастных интервалов с их отбраковкой. Исследования проведены с учетом принципа тектонофизического анализа от «объекта к процессу, затем к динамике» [Goncharov et al., 2005, с. 137]. Далее приводится описание выполняемых процедур на этих двух стадиях.

4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ТРЕЩИН В ПОРОДАХ РАЗНОГО ВОЗРАСТА И РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Рассмотрим некоторые особенности в распределении трещиноватости изученных обнажений горных пород на примере Нурата-Кызылкумского региона. На [рис. 3](#) приводятся диаграммы ориентировок азимутов падений и простираний «максимумов» плотности трещин, полученных, как было отмечено выше, на прямоугольных матрицах для отдельных локальных пунктов наблюдений, сгруппированных для горных пород соответствующего возраста.

Наблюдаемое в четвертичных породах преобладающее северо-восточное простирание (40 и 220°, [рис. 3, б](#)) «максимумов» отмечается почти во всех горных породах других возрастов: в неогеновых ([рис. 3, д](#)), близкое к ним – в палеогеновых (20 и 200°, [рис. 3, з](#)), в меловых ([рис. 3, л](#)).

На роза-диаграммах азимутов падений им соответствуют максимумы: в четвертичных – с падением на

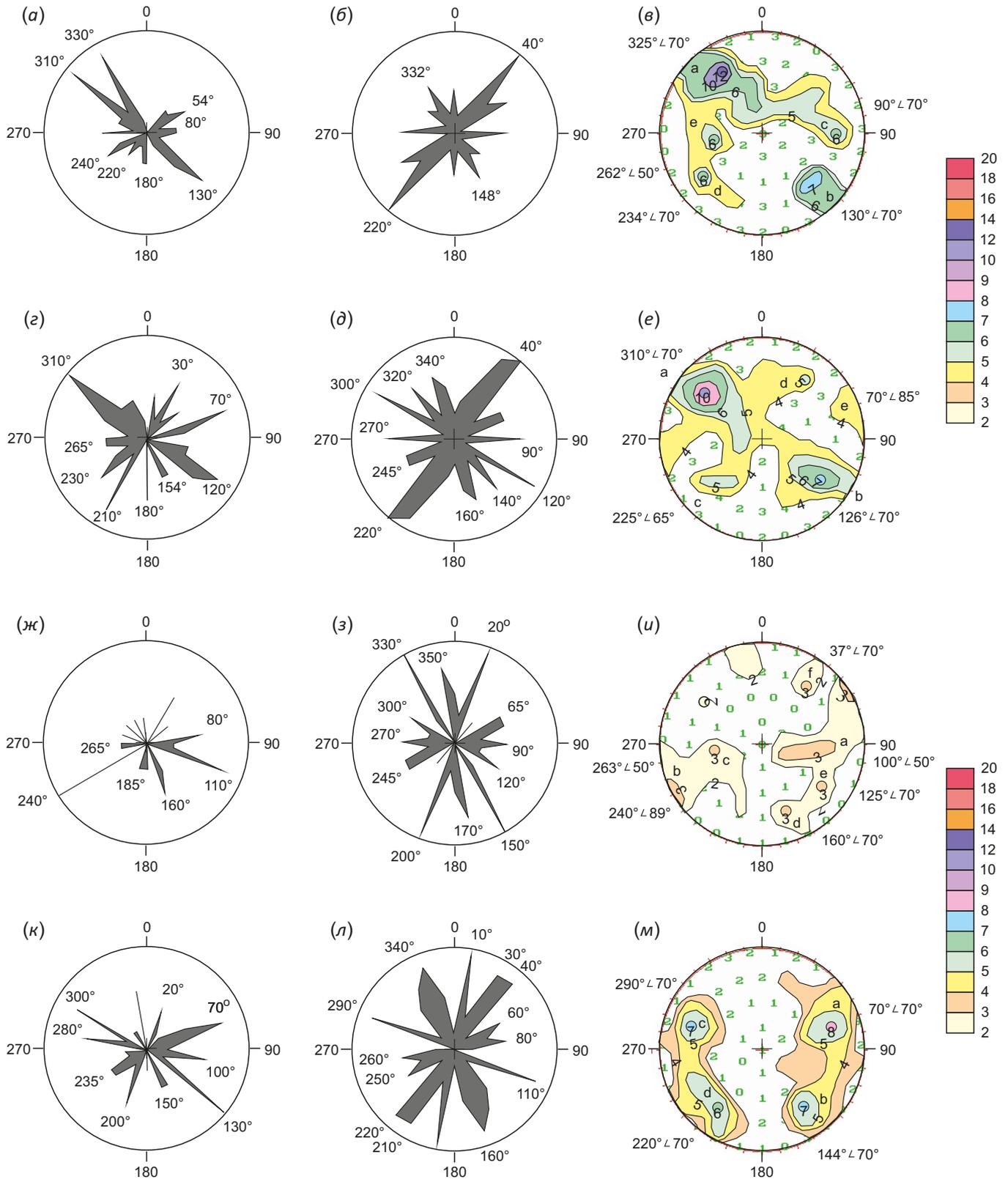


Рис. 3. Роза-диаграммы ориентации трещин (сводных максимумов плотности трещин локальных пунктов наблюдений) и диаграммы плотности полюсов (на палетке Пронина) для горных пород мезозоя – кайнозоя Нурата-Кызылкупского региона. Диаграммы для горных пород (соответственно: первый столбец – падения, второй – простирания, третий – плотность полюсов) разного возраста: (а-в) – четвертичных, (z-е) – неогеновых, (ж-и) – палеогеновых, (к-м) – меловых.

Fig. 3. Rose diagrams for fracture orientations (summary fracture density maxima of local observation points) and pole density diagrams (on the Pronin's palette) for MZ – KZ rocks of the Nurata-Kyzylkum region. Diagrams for heterochronous rocks (the first column – dip roses, the second – strike roses, the third – density of the poles): (a-в) – Quaternary, (z-е) – Neogene, (ж-и) – Paleogene, (к-м) – Cretaceous.

северо-запад по азимуту 310° , а также с падением к юго-востоку по азимуту 130° (рис. 3, а), в неогеновых – 310 и 120° (рис. 3, г), в палеогеновых – 110° (рис. 3, ж), в меловых – 130° (рис. 3, к).

На диаграммах плотности полюсов «максимумов» отмечаются повышенные значения: в четвертичных – $325^\circ \angle 70^\circ$ и $130^\circ \angle 70^\circ$ (рис. 3, в), в неогеновых – $310^\circ \angle 70^\circ$ и $126^\circ \angle 70^\circ$ (рис. 3, е), в палеогеновых – $125^\circ \angle 70^\circ$ (рис. 3, и), в меловых – проявляются в зоне максимума, близкого к $290^\circ \angle 70^\circ$ (рис. 3, м), а при сопоставлении с розой падений – $310^\circ \angle 70^\circ$ и $130^\circ \angle 70^\circ$. Анализ этих данных по Нурата-Кызылкумскому региону, а также и по другим регионам – Туркестано-Зарафшанскому, Гиссару и его юго-западным отрогам – показал, что характерные элементы ориентации «максимумов» плотности трещин и сводных диаграмм их плотности, отмеченные в четвертичных породах, проявляются с той или иной выраженностью в породах и более раннего возраста: неогеновых, палеогеновых, меловых, а также палеозойских (последние в настоящей статье не рассматриваются).

Отмечается сложная картина положений «максимумов» плотности полюсов трещин, свидетельствующая о проявлении наложенных систем трещин разновозрастных генераций. При этом практически во всех возрастных интервалах заметно проявление системы трещин, характерной для неоген-четвертичного времени. Логично предположить, что использование этих данных позволяет осуществить реконструкцию позднекайнозойского поля напряжений.

На рис. 4 представлены диаграммы, полученные по методике [Nikolaev, 1992] по сводным данным трещин в породах разного возраста¹. Для четвертичных и неогеновых пород они практически совпадают. Отмечается и сходство с ними диаграммы по механизмам очагов землетрясений (рис. 4, ж), полученным на основе сводных данных сколовых поверхностей, плотность и асимметричный разброс которых определялись на прямоугольной матрице [Nikolaev, 1992, с. 63]. Это свидетельствует о том, что либо в четвертичных и неогеновых породах отражается современное поле напряжений (фиксируемое в очагах землетрясений), либо это современное поле напряжений унаследованно развивается от неоген-четвертичного. Анализ региональных тектонических процессов региона позволяет принять последнее. В связи с этим можно считать, что региональные статистические исследования особенностей трещиноватости разновозрастных горных пород (без отсеивания наложенных трещин других возрастных интервалов) дают возможность реконструировать поля напряжений именно неоген-четвертичного возраста. Как показал анализ особенностей проявления трещин в породах более раннего возраста, и в них (при соответствующей генерализации) прослеживаются элементы

регионального поля напряжений новейшего времени. В горных породах разного возраста наблюдается сходство типов деформационных режимов (рис. 4, г–е) – взбросового и взбрососдвигового с субгоризонтальной осью напряжения сжатия при наклонном положении двух других осей. Отличие в ориентировках осей сжатия в палеогеновых и меловых породах от четвертичных, неогеновых и юрских может объясняться фактом наложения трещин широкого генезиса и искажением данных за счет наложения более ранних элементов деформаций.

Основные на фактически наложенных друг на друга деформациях различных временных отрезков, круговые диаграммы (рис. 4, г–ж) отражают искаженную информацию и не являются палеотектоническими стресс-состояниями прошлого. Действительно, чем древнее порода, тем сложнее характер проявления в ней наложенной тектонической трещиноватости. В таком виде их нельзя использовать для реконструкций палеотектонических напряжений более ранних этапов деформирования земной коры региона.

Таким образом, на основании вышеизложенного анализа можно считать определенным лишь возраст неоген-четвертичного поля напряжений I ранга (рис. 4, а). Оно фиксируется в четвертичных породах (рис. 4, б) и других возрастных группах, отмечается и по механизмам очагов землетрясений (рис. 4, ж).

5. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАЛЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ МЕЗОЗОЯ – КАЙНОЗОЯ

Если четвертичные породы фиксируют элементы четвертичных и современных деформаций, то в неогеновых породах отражаются элементы деформаций четвертичного (в том числе современного) возраста, а также неогенового (естественно – следующего за образованием пород). В породах палеогенового возраста окажутся зафиксированными все последующие наложенные элементы деформаций неогенового и четвертичного периодов и т.д. В качестве примера на рис. 5 приводятся структурные диаграммы трещин после последовательного отсева наложенной трещиноватости (условно назовем их «чистыми») для Нурата-Кызылкумского региона. Как видно, в «чистых» диаграммах для пород неогена (после отсева трещин четвертичных пород) общая картина сохраняется. Вместе с тем проявляется небольшое число северо-западной (юго-восточной) ориентировки трещин при северо-восточных и юго-западных румбах падения. Видно, что в неогеновое время имеют место системы трещин с азимутами и углами падений (рис. 5, в): $310^\circ \angle 10-65^\circ$, $125^\circ \angle 10-70^\circ$, $70^\circ \angle 70^\circ$, $225^\circ \angle 60^\circ$, $270^\circ \angle 25^\circ$, $266^\circ \angle 82^\circ$.

¹ Следует иметь в виду, что диаграмма поля напряжений, полученная для горной породы определенного возраста, еще не означает возраст поля напряжений. В статье говорится о диаграммах, полученных в горных породах разного возраста, и диаграммах поля напряжений, соответствующих определенным временным интервалам геохронологической таблицы, идентифицируемым как возраст поля напряжений.

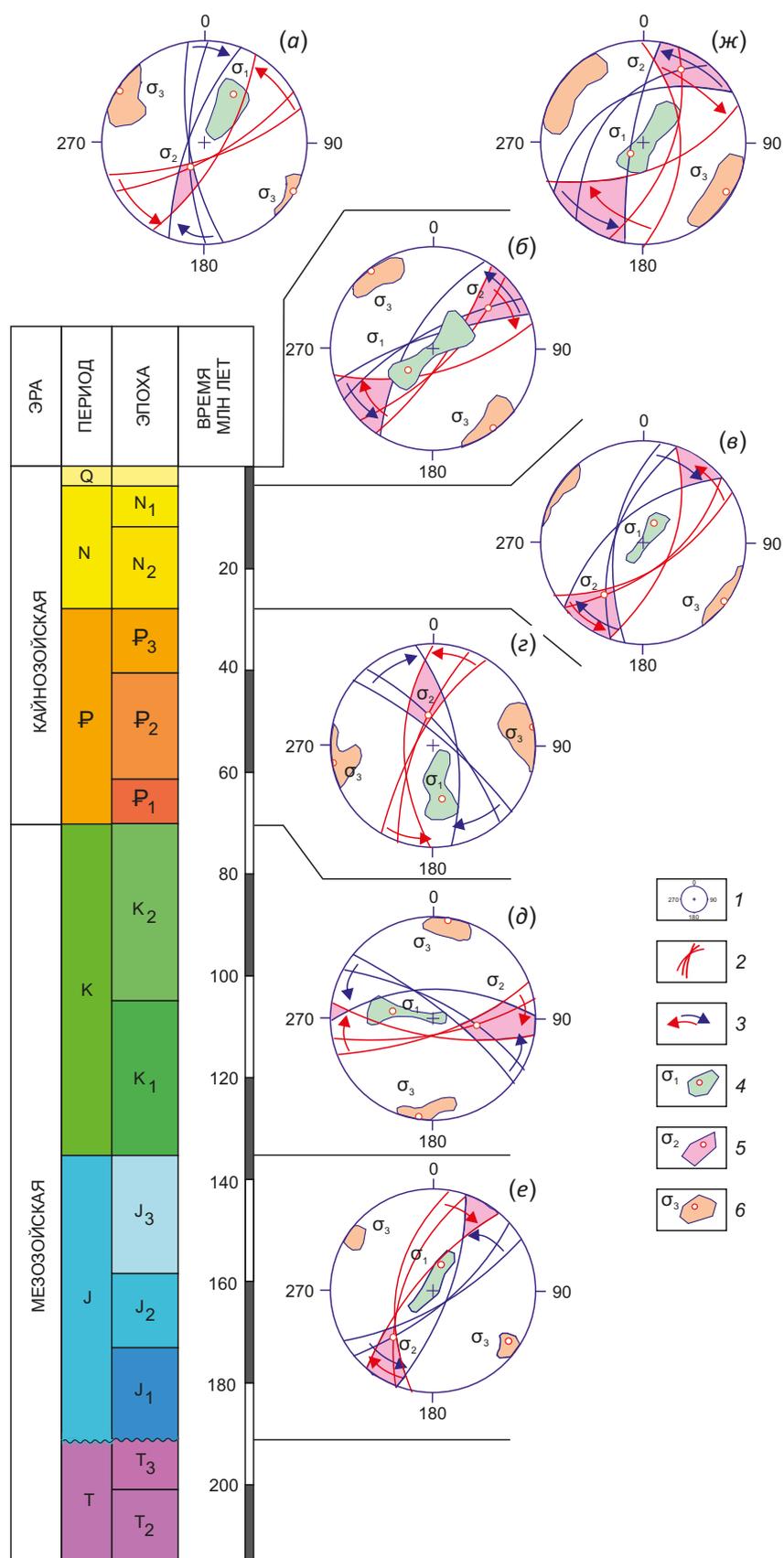


Рис. 4. Стереографические диаграммы ориентировок осей главных нормальных напряжений, полученных по сводным данным трещин в породах разного возраста (а-е) и по данным механизмов очагов землетрясений (ж) западной периклинальной части Тянь-Шаня.

1 – проекции ориентировок осей главных нормальных напряжений на верхней полусфере сетки Вульфа (буквами на рисунке обозначены диаграммы, полученные по сводным данным: (а) – всего региона, (б) – четвертичных пород, (в) – неогеновых

пород, (z) – палеогеновых пород; (d) – меловых пород; (e) – юрских пород; (жс) – механизмов очагов землетрясений); 2 – проекция следов выхода на верхнюю полусферу поверхностей трещин – модальной («максимума» плотности трещин для сводной диаграммы) и крайних членов асимметричного разброса; 3 – направление асимметричного разброса сколовых поверхностей (от максимума плотности трещин); 4–6 – проекция точки выходов на верхнюю полусферу осей главных нормальных напряжений и области их разброса: 4 – растяжения (σ_1), 5 – промежуточного (σ_2), 6 – сжатия (σ_3).

Fig. 4. Stereographic diagrams of orientations of the axes of the principal stresses obtained from the summary data on cracks in heterochronous rocks (a–e) and from the data on the earthquake focal mechanisms (жс) of the western periclinal part of the Tien Shan. 1 – projections of the orientations of the axes of the principal stresses on the upper hemisphere of the Wolfe Grid (the letters in the Figure indicate the diagrams obtained from the summary data: (a) – the whole region; (б) – Quaternary rocks; (в) – Neogene rocks; (z) – Paleogene rocks; (d) – Cretaceous rocks; (e) – Jurassic rocks; (жс) – earthquake focal mechanisms); 2 – projection of traces of emergence on the upper hemisphere of the surfaces of cracks – modal ("maximum" density of cracks for the summary diagram) and extreme members of asymmetric scattering; 3 – direction of asymmetric scattering of shear surfaces (from the maximum density of cracks); 4–6 – projection of points of exit to the upper hemisphere for the axes of the principal stresses and their scattering area: 4 – tension (σ_1), 5 – intermediate (σ_2), 6 – compression (σ_3).

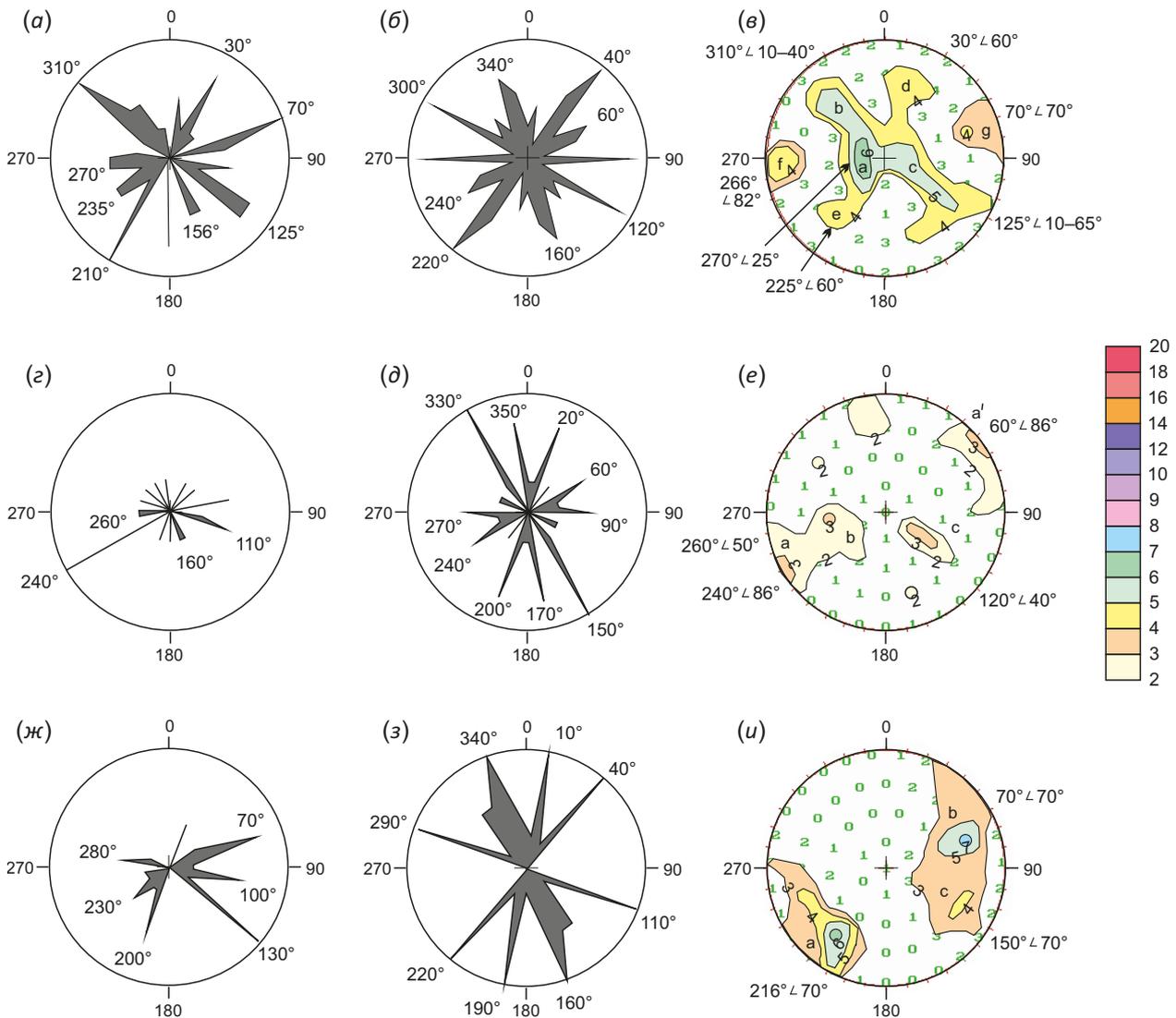


Рис. 5. Роза-диаграммы ориентации «максимумов» плотности трещин и диаграммы плотности полюсов для горных пород разного возраста Нурата-Кызылкупского региона, освобожденные от последующих наложенных генераций. Диаграммы «максимумов» трещин для горных пород разного возраста без наложенных трещин поздних генераций (соответственно для всех: первый столбец – падения, второй – простирания, третий – плотность полюсов): (a–в) – неогеновых, (z–e) – палеогеновых, (жс–u) – меловых.

Fig. 5. Rose diagrams of the fracture density maxima orientation and pole density diagrams for heterochronous rocks in the Nurata-Kyzylkum region without subsequent superimposed generations. Diagrams of fracture "maximums" for heterochronous rocks without superimposed fractures of late generations (the first column – dip roses, the second – strike roses, the third – the density of the poles): (a–в) – Neogene, (z–e) – Paleogene, (жс–u) – Cretaceous.

Часть из них продолжает (в той или иной мере, иногда с небольшим угловым разбросом) фиксироваться в четвертичных породах (см. рис. 3, а, в): $310^\circ \angle 70^\circ$, $130^\circ \angle 70^\circ$, $220-225^\circ \angle 65^\circ$ и др. В «чистых» диаграммах палеогеновых пород преобладает система трещин с азимутом падения (рис. 5, е) $240^\circ \angle 86^\circ$, $60^\circ \angle 86^\circ$, $120^\circ \angle 40^\circ$, $260^\circ \angle 50^\circ$, а в «чистых» диаграммах для меловых пород характерны максимумы (рис. 5, ж, и) с азимутами падений $216^\circ \angle 70^\circ$, $70^\circ \angle 70^\circ$, $115^\circ \angle 70^\circ$.

Полученные таким образом генерализованные данные «максимумов» плотности трещин использованы в последующем для реконструкции диаграмм ранговых составляющих полей напряжений более ранних этапов, предшествующих новейшему времени. Общерегиональное поле напряжений I ранга, полученное по геолого-структурным данным (рис. 6, а), оценивается как позднекайнозойское, а диаграмма (б) на рис. 6, полученная по механизмам очагов землетрясений, отражает современное поле напряжений. Последующие диаграммы (рис. 6, в-и) соответствуют различным фазам выделенных ритмов I ранга.

В пределах западной части Тянь-Шаня в палеогеновое время проявляется общерегиональное сбросовое поле напряжений, ось главного нормального растяжения которого субгоризонтальна и имеет субмеридиональную ориентировку (рис. 6, д).

Ось главного нормального сжатия субвертикальна, ось промежуточного напряжения субгоризонтальна и субширотного простирается. Это поле напряжений характерно для времени «пассивной» фазы второго ритма первого ранга (рис. 6, д) и, видимо, определило общий тектонический режим преобладания широкорегиональных опусканий территории с морской трансгрессией.

Для мелового времени характерно проявление взбросовых и взбросодвиговых полей напряжений. Ось главного нормального сжатия имеет субмеридиональное простираение с небольшим отклонением к северо-западу (юго-востоку) (рис. 6, в). Анализ показывает, что в целом наблюдается чередование динамической обстановки двух типов поля напряжений – взбросового и сбросового.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты тектонофизического анализа по данным о механизмах очагов землетрясений, выполненные Ю.Л. Ребецким по Алтае-Саяну и Северному Тянь-Шаню, показывают, что в коре поднятий оси максимального сжатия, как правило, субгоризонтальны, а в коре прогибов субгоризонтальна ось главного напряжения минимального сжатия (максимального девиаторного растяжения) [Rebetsky, 2015]. Отмеченные в настоящей работе динамические обстановки различных этапов мезозойско-кайнозойской истории изучаемого региона также показывают, что режиму региональных воздыманий первого ранга, обозначенных нами как «активные» фазы (R_{III}^5 , R_{II}^3 , R_I^1), соответствует поле напряжений с субгоризонтальным сжатием при

субвертикальной оси растяжения (рис. 6, а, г, е, и). Фазы региональных опусканий («пассивные») характеризуются палеонапряженным состоянием с субгоризонтальной осью растяжения при субвертикальном положении оси сжатия (рис. 6, д, ж). Наблюдается чередование фаз «сжатия» и «растяжения», длительность которых различная. Обозначенные на рисунке границы фаз условны, поскольку переход обстановки «сжатия» в «растяжение» не происходит мгновенно. Эти данные изменений полей напряжений для отдельных интервалов времени мезозоя – кайнозоя отличаются от таковых, описанных в работе [Belousov et al., 1997], где авторами получено стабильное (почти неизменное по ориентации осей напряжений) поле начиная от палеозоя, в течение всего мезозоя – кайнозоя.

По данным о современных геодинамических режимах областей впадин и поднятий такой переход может занять до 10 млн лет, а значения дополнительных сжимающих напряжений могут составить около 5.4 кбар [Rebetsky, 2015]. Сопоставление диаграмм полей напряжений для четвертичных и неогеновых пород с современными, основанными на данных механизмов очагов землетрясений позволяет считать, что современное поле напряжений I ранга зародилось и существует с позднеолигоценового времени. Об этом свидетельствуют и диаграммы позднеолигоцен-четвертичного времени. Важно отметить, что описанные результаты имеют общее сходство (деформационных режимов) с результатами изучения кайнозойского напряженного состояния других сопредельных регионов, например в пределах «кыргызской» части Тянь-Шаня [Kalmet'eva et al., 2019], а также Монголии, где отмечена тенденция «вариации направления максимального горизонтального сжатия от субмеридионального на западе до северо-восточного в центральной части» [Parfeevets, Sankov, 2018]. При этом установлено увеличение доли режимов сдвига, транспрессии и сжатия на современном этапе для центральной и северной части Монголии, что отражает эволюцию поля напряжений с постепенным увеличением роли сжатия во времени [Parfeevets, Sankov, 2018].

Следует отметить, что полученные результаты перестройки палеотектонодинамических обстановок с чередованием режимов «сжатий» и «растяжений» могут быть связаны с более сложными факторами, чем это постулируется как боковое латеральное давление, формирующееся при поступательном движении «литосферных плит». Последним также трудно объяснить наличие специфических линейных узких структур в виде шовных зон, которые в работе [Leonov et al., 2018] были отнесены к типу структур «цветка», образованных как следствие проявления «зон концентрированной деформации» ввиду несоответствия показателя ранга. Авторы этой работы отмечают, что зоны концентрированной деформации отражают преимущественно обстановки транспрессии и их формирование сопровождается 3D пластическим сдвиговым течением вещества и дилатансией деформируемого объема.

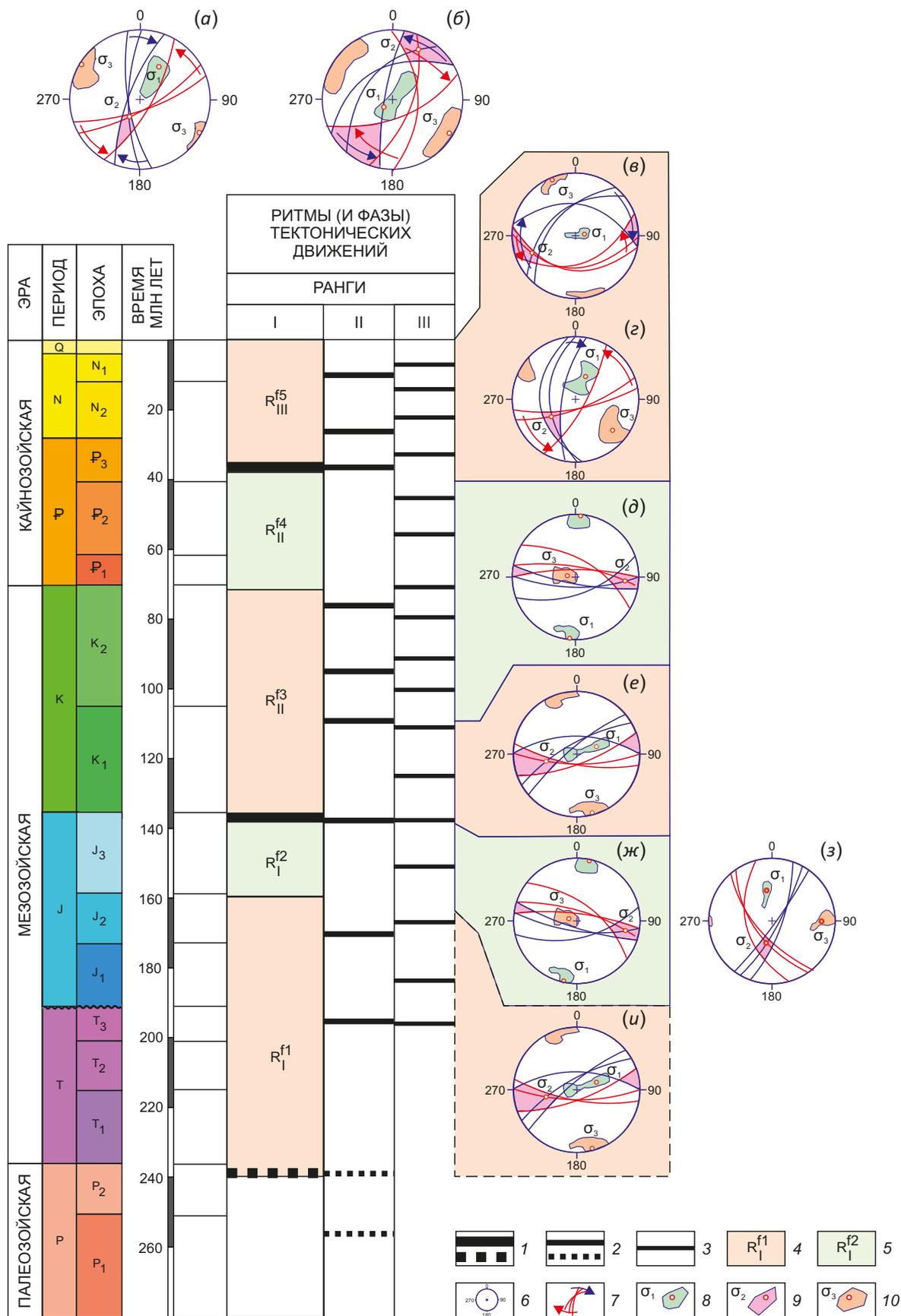


Рис. 6. Основные этапы деформационных режимов полей напряжений I ранга в MZ – KZ западной части Тянь-Шаня. 1–3 – рубежи ритмов (сплошная – уверенные, пунктирная – предполагаемые): 1 – I ранга, 2 – II ранга, 3 – III ранга. Фазы ритмов I ранга (римская цифра в нижнем индексе соответствует номеру ритма): 4 – «активные» ($R_{III}^5, R_{II}^3, R_I^1$), 5 – «пассивные» (R_{II}^4, R_I^2). 6 – стереографические проекции ориентировок осей главных нормальных напряжений (буквами на рисунке обозначены

круговые диаграммы I ранга разного возраста: (а, б) – общерегиональные: (а) – позднекайнозойские, по геологическим данным; (б) – по механизмам очагов землетрясений. Диаграммы полей напряжений различных фаз крупнейших периодов перестроек I ранга в мезозое – кайнозое: (е, з) – R_{III}^5 – позднеолигоцен-голоценовая ((е) – четвертичная, (з) – неогеновая); (д) – R_{II}^4 апт-раннесреднеолигоценная; (е) – «активная» R_{III}^3 – поздняя юра – неокомская; (ж) – предполагаемая, вторая «пассивная» фаза (R_I^2) – келловей – оксфорд-титонская; (з) – для той же фазы, полученная по региону юго-западных отрогов Гиссара; (и) – первая «активная» фаза (R_I^1) – пермотриас – нижнесреднеюрская). 7 – сколовые поверхности и направления их асимметричного разброса; 8–10 – проекции точек выходов на верхнюю полусферу осей главных нормальных напряжений и области их разброса: 8 – растяжения (σ_1), 9 – промежуточного (σ_2), 10 – сжатия (σ_3).

Fig. 6. The main stages of deformation regimes of the first-rank stress fields in the MZ-KZ of the western part of the Tien Shan. 1–3 – boundaries of rhythms (solid – known, dotted – inferred): 1 – I rank; 2 – II rank; 3 – III rank. Phases of rhythms of the I rank (the Roman numeral in the subscript corresponds to the rhythm number): 4 – "active" (R_{III}^5 , R_{III}^5 , R_I^1), 5 – "passive" (R_{II}^4 , R_I^2). 6 – stereographic projections of the orientations of the axes of the principal stresses (letters in the Figure indicate the first-rank heterochronous circular diagrams: (a, б) – region-based: (a) – Late Cenozoic, according to geological data; (б) – according to the earthquake focal mechanisms. Stress field diagrams of various phases of the largest periods of the first-rank reconstructions in MZ – KZ: (e, z) – R_{III}^5 – late Oligocene-Holocene ((e) – Quaternary, (z) – Neogene); (d) – R_{II}^4 Apt – Early-Middle Oligocene; (e) – R_{III}^3 "active" – Jurassic – Neocomian; (ж) – presumed second "passive" phase (R_I^2) – Callowian-Oxfordian-Tithonian; (з) – the same phase, obtained for the region of the SW spurs of Hissar ridge; (и) – the first "active" phase (R_I^1) – Permo-Triassic – Lower-Middle Jurassic). 7 – shear surfaces and directions of their asymmetric scattering; 8–10 – projections of the points of exit to the upper hemisphere of the axes of the principal stresses and their scattering areas: 8 – tension (σ_1), 9 – intermediate (σ_2), 10 – compression (σ_3).

О том, что напряженно-деформированное состояние эпиплатформенных орогенов не может быть сформировано при латеральном сжатии как обстановке, не соответствующей реальным тектонофизическим данным, было указано также и в работе [Myagkov, Rebetsky, 2019]. Авторы отмечают, что с позиций тектонофизики одним из наиболее существенных факторов формирования напряженно-деформированного состояния земной коры орогенов Центральной Азии является астеносферная конвекция. Существуют также данные о наличии в земной коре «тангенциальных массовых сил» в связи с особенностями вращения Земли вокруг своей оси [Rebetsky, 2016], оценка уровня которых показывает их существенное влияние на напряженное состояние литосферы как фактор, обуславливающий кинематику литосферных плит. Пока не стоит дальше углубляться в эту проблему, исходя лишь из приведенных в настоящей статье результатов. Для обеспечения достоверности и полноты суждений о палеотектонодинамических обстановках исследуемого региона необходимы реконструкции региональных полей напряжений отдельных структурных единиц, а также более высоких ранговых составляющих и дальнейший синтез их в рамках системной тектонодинамической модели. А пока можно констатировать, что в истории мезозоя – кайнозоя региона поле напряжений, которое соответствует новейшему этапу, не является новым, а уже проявлялось в активных фазах первого и второго выделенных ритмов I ранга.

Отмеченное исследователями постепенное усиление тектонической активности от позднего палеозоя до позднего кайнозоя [Dalimov, Troitsky, 2005] с максимальным размахом амплитуд колебаний в неоген-четвертичное время можно объяснить как проявление глобального ритма низшего ранга (выходящего за рамки настоящей работы и называемого надранговым), максимум «активной» фазы которого приходится на поздний кайнозой. Факт усиления активности движений и деформаций в это время представляется резонансным

явлением наложения нескольких «активных» фаз ритмов отмеченного глобального и более высоких составляющих I и II рангов.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, реконструкции полей напряжений отдельных выделенных этапов мезозоя – кайнозоя позволяют установить рубежи их перестроек, которые соответствуют границам «активных» и «пассивных» фаз выделенных этапов I ранга. Всего за период от позднего палеозоя до новейшего их насчитывается пять: первый приходится на поздний палеозой – ранний мезозой (пермотриас); второй – средняя – поздняя юра; третий соответствует границе киммеридж-титона поздней юры и валанжина раннего мела; четвертый рубеж соответствует концу позднего мела (апт) – началу палеогена (палеоцена), с которого происходит общее опускание территории в поле преобладающих сбросовых напряжений. К началу олигоцена относится самый поздний, пятый, рубеж перестройки общерегионального поля напряжений, который соответствует началу новейшего этапа. Произошел переход от сбросового поля напряжений к взбросовому и взбрососдвиговому типу, определяющим общее воздымание территории и преобладание положительных структурных элементов. Оно продолжается в четвертичное время и в современный период, отражаясь в очагах землетрясений. С указанными фазами соответствующих этапов I ранга связано время действия тектонодинамических систем, для каждой из них свойственны свое поле напряжений, свои особенности тектонических движений и деформаций.

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Автор заявляет об отсутствии какого-либо конфликта интересов. Автор прочел и одобрил финальную версию перед публикацией.

The author has no conflicts of interest to declare. The author read and approved the final manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Akhmedzhanov M.A., Borisov O.V., 1977. Tectonics of the Premesozoic Formations of the Central and Southern Tien Shan. Fan, Tashkent, 183 p. (in Russian) [Ахмеджанов М.А., Борисов О.М. Тектоника домезозойских образований Срединного и Южного Тянь-Шаня. Ташкент: Фан, 1977. 183 с.].
- Babaev A.G., Simonenko A.N., Babaev G.A., 1990. Formations of the Jurassic Paleo-Sedimentary Basins of Uzbekistan and Their Oil-and-Gas Content. Fan, Tashkent, 292 p. (in Russian) [Бабаев А.Г., Симоненко А.Н., Бабаев Г.А. Формации юрских палеоседиментационных бассейнов Узбекистана и их нефтегазоносность. Ташкент: Фан, 1990. 292 с.].
- Belousov T.P., Kurtasov S.F., Mukhamediev Sh.A., 1997. The Earth's Crust Divisibility and Paleostresses in Seismotectonic and Oil-and-Gas-Bearing Regions. IPE RAS, Moscow, 324 p. (in Russian) [Белусов Т.П., Куртасов С.Ф., Мухамедиев Ш.А. Делимость земной коры и палеонапряжения в сейсмоактивных и нефтегазоносных районах Земли. М.: ИФЗ РАН, 1997. 324 с.].
- Borisov O.M., 1982. Fault Tectonics of Middle Asia. In: Metallogenic Problems of Middle Asia. Fan, Tashkent, p. 37–53 (in Russian) [Борисов О.М. Разломная тектоника Средней Азии // Металлогенические проблемы Средней Азии. Ташкент: Фан, 1982. С. 37–53].
- Bubniak I.M., Vikhot Yu.M., Nakapelyukh M.V., 2013. The Stress-and-Strain State of the Southeastern Part of the Skyba and Boryslavpokyttya Nappes of the Ukrainian Carpathians. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (3), 313–326 (in Russian) [Бубняк И.Н., Вихоть Ю.М., Накапелюх М.В. Напряженно-деформированное состояние юго-восточной части Скибового и Бориславско-Покутского покровов Украинских Карпат // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 3. С. 313–326]. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-3-0103>.
- Chernyshev S.N., 1983. Rock Fractures. Nauka, Moscow, 240 p. (in Russian) [Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М.: Наука, 1983. 240 с.].
- Dalimov T.N., Troitsky V.I., 2005. Evolutionary Geology (History of Geological Evolution of the Earth). University, Yangiyo'l Poligraf Servis, Tashkent, 583 p. (in Russian) [Далимов Т.Н., Троицкий В.И. Эволюционная геология (История геологической эволюции Земли). Ташкент: Университет, Yangiyo'l poligraf servis, 2005. 583 с.].
- Dzhamalov D.B., Abdullaev R.N., Tulyaganova N.Sh., 2016. Paleo-Transform Faults and Their Role in Formation of the Earth's Crust of the Tien Shan. *Geology and Mineral Resources* 5, 3–10 (in Russian) [Джамалов Д.Б., Абдуллаев Р.Н., Туляганова Н.Ш. Палеотрансформные нарушения и их роль в формировании земной коры Тянь-Шаня // Геология и минеральные ресурсы. 2016. № 5. С. 3–10].
- Gintov O.B., 2005. Field Tectonophysics and Its Application in Studies of Deformation of the Earth's Crust. Phoenix, Kiev, 572 p. (in Russian) [Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры. Киев: Феникс, 2005. 572 с.].
- Gintov O.B., Murovskaya A.V., Mychak S.V., 2013. Field Tectonophysics in Solutions of Geodynamic Evolution Problems of the Ukraine Territory. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (3), 281–299 (in Russian) [Гинтов О.Б., Муровская А.В., Мычак С.В. Полевая тектонофизика в решении проблем геодинамического развития территории Украины // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 3. С. 281–299]. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-3-0101>.
- Goncharov M.A., Talitsky V.G., Frolova N.S., 2005. Introduction to Tectonophysics. Textbook. University Book House, Moscow, 496 p. (in Russian) [Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику: Учебное пособие. М.: Книжный дом «Университет», 2005. 496 с.].
- Gzovsky M.V., 1975. Fundamentals of Tectonophysics. Nauka, Moscow, 536 p. (in Russian) [Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.].
- Kalmet'eva Z.A., Moldobekov B.D., Abdybachev U.A., 2019. Correlation of the State of Crustal Stresses, Seismicity and Landslide Activity (Fergana Basin, Tien Shan). *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (4), 995–1009 (in Russian) [Кальметьева З.А., Молдобеков Б.Д., Абдыбачаев У.А. Соотношение напряженного состояния земной коры, сейсмичности и оползневой активности (на примере Ферганской впадины, Тянь-Шань) // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 4. С. 995–1009]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-4-0454>.
- Leonov M.G., Morozov Yu.A., Stephanov Yu.P., Bakeev R.A., 2018. Zones of Concentrated Deformation (Flower Structures): Field Observations and Modeling Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (3), 693–720 (in Russian) [Леонов М.Г., Морозов Ю.А., Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А. Зоны концентрированной деформации (структуры цветка): натурные наблюдения и данные моделирования // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 693–720]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0368>.
- Lordkipanidze L.N., Tsai O.G., 2017. Analysis of the Schemes from the Catalogue of the Faults of the Central and Southern Tien Shan and Adjacent Areas. *Geology and Mineral Resources* 1, 3–10 (in Russian) [Лордкипанидзе Л.Н., Цай О.Г. Анализ схем Каталога разломов Срединного, Южного Тянь-Шаня и прилегающих территорий // Геология и минеральные ресурсы. 2017. № 1. С. 3–10].
- Myagkov D.S., Rebetsky Yu.L., 2019. Mathematical Models Simulating the Formation of the Stress-Strain State of Epipatform Orogens. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (1), 21–41 (in Russian) [Мягков Д.С., Ребецкий Ю.Л. Математическая модель формирования напряженно-деформированного состояния эпиплатформенных орогенов // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 1. С. 21–41]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-1-0402>.
- Nikolaev P.N., 1977. Methods of Statistical Analysis of Fractures and Reconstruction of Tectonic Stresses. *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration* 12, 103–115 (in Russian) [Николаев П.Н. Методика статистического анализа трещин и реконструкция полей напряжений // Известия вузов. Геология и разведка. 1977. № 12. С. 103–115].

Nikolaev P.N., 1992. Method of Tectonic-Dynamic Analysis. Nedra, Moscow, 295 p. (in Russian) [Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа. М.: Недра, 1992. 295 с.].

Omonov Kh.A., Khan R.S., Sultanov I.S., 2016. Improvement of Current Methods to Conduct Regional Studies in the Folded System of the Southern Tien Shan. *Geology and Mineral Resources* 4, 19–24 (in Russian) [Омонов Х.А., Хан Р.С., Султанов И.С. Совершенствование современных методов, применяемых при региональных исследованиях в горно-складчатой системе Южного Тянь-Шаня // Геология и минеральные ресурсы. 2016. № 4. С. 19–24].

Parfeevets A.V., Sankov V.A., 2018. Geodynamic Conditions for Cenozoic Activation of Tectonic Structures in Southeastern Mongolia. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (3), 855–888 (in Russian) [Парфеевец А.В., Саньков В.А. Геодинамические условия кайнозойской активизации тектонических структур Юго-Восточной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 855–888]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0374>.

Rebetsky Yu.L., 2015. On the Specific State of Crustal Stresses in Intracontinental Orogens. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (4), 437–466 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Об особенностях напряженного состояния коры внутриконтинентальных орогенов // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 4. С. 437–466]. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2015-6-4-0189>.

Rebetsky Yu.L., 2016. On Small Tangential Mass Forces That May Exist in the Lithosphere. Their Role in Tectonics and Geodynamics. *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (4), 691–704 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. О возможности существования в литосфере малых тангенциальных массовых сил. Их роль в тектонике и геодинамике // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 4. С. 691–704]. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0229>.

Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V., 2017. From Slickensides to Tectonic Stress. Techniques and Algorithms. GEOS, Moscow, 234 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 234 с.].

Sankov V.A., Parfeevets A.V., Miroshnichenko A.I., Byzov L.M., Lebedeva M.A., Sankov A.V., Dobrynina A.A., Kovalenko S.N., 2017. Late Cenozoic Faulting and the Stress State in the South-Eastern Segment of the Siberian Platform. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (1), 81–105 (in Russian) [Саньков В.А., Парфеевец А.В., Мирошниченко А.И., Бызов Л.М., Лебедева М.А., Саньков А.В., Добрынина А.А., Коваленко С.Н. Позднекайнозойское разломообразование и напряженное состояние юго-восточной части Сибирской платформы // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 1. С. 81–105]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0233>.

Seminsky K.Zh., 2005. Mapping of the Faultblock Structure of the Crust at the Current Level of Development of Tectonophysics. *Geophysical Journal* 27 (1), 85–96 (in Russian)

[Семинский К.Ж. Картирование разломно-блоковой структуры земной коры на современном этапе развития тектонофизики // Геофизический журнал. 2005. Т. 27. № 1. С. 85–96].

Seminsky K.Zh., 2014. Specialized Mapping of Crustal Fault Zones. Part 1: Basic Theoretical Concepts and Principles. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (2), 445–467 (in Russian) [Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 445–467]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0136>.

Sherman S.I., 2012. Destruction of the Lithosphere: Fault-block Divisibility and Its Tectonophysical Regularities. *Geodynamics & Tectonophysics* 3 (4), 315–344 (in Russian) [Шерман С.И. Деструкция литосферы: разломно-блоковая делимость и ее тектонофизические закономерности // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. № 4. С. 315–344]. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0077>.

Sherman S.I., Dneprovsky Yu.I., 1989. Stress Fields of the Earth's Crust and Geological and Structural Methods for Their Study. Nauka, Novosibirsk, 158 p. (in Russian) [Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, 1989. 158 с.].

Sim L.A., 2013. Overview of the State of Knowledge on Paleotectonic Stresses and Their Implications for Solution of Geological Problems. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (3), 341–361 (in Russian) [Сим Л.А. Краткий обзор состояния изученности палеотектонических напряжений и их значение для решения геологических задач. Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4. № 3. С. 341–361]. <https://doi.org/10.5800/GT-2013-4-3-0105>.

Sitdikov B.B., 1985. Neotectonics of the Western Tien Shan (by the Example of the Central Kyzyl Kum and Fergana Basin). Fan, Tashkent, 144 p. (in Russian) [Ситдииков Б.Б. Неотектоника Западного Тянь-Шаня (на примере Центральных Кызылкумов и Ферганской впадины). Ташкент: Фан, 1985. 144 с.].

Umurzakov R.A., 2012. On Reconstruction of Paleotectonic Stresses at Certain Stages of the Alpine History of the Western Tien Shan. In: *Current Problems of Geodynamics and Geoecology of the Intracontinental Orogens. Proceedings of the 5th International Symposium (June 19–24, 2011)*. Vol. 1. Research Station RAS, Bishkek, p. 127–133 (in Russian) [Умурзаков Р.А. О реконструкции палеотектонических напряжений отдельных этапов альпийской истории Западного Тянь-Шаня // Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Материалы 5-го международного симпозиума (19–24 июня 2011 г.). Бишкек: ИС РАН, 2012. Т. 1. С. 127–133].

Yuryev A.A., Umarov A.U., 1971. Geomorphology and Neotectonics of Western Uzbekistan. Fan, Tashkent, 115 p. (in Russian) [Юрьев А.А., Умаров А.У. Геоморфология и новейшая тектоника Западного Узбекистана. Ташкент: Фан, 1971. 115 с.].