

**THE CURRENT STRESS OF EARTH'S CRUST IN THE TERRITORY OF UZBEKISTAN
ACCORDING TO FOCAL EARTHQUAKE MECHANISMS****T.L. Ibragimova** ¹✉, **R.S. Ibragimov** ¹, **M.A. Mirzaev** ¹, **Yu.L. Rebetsky** ²¹ Mavlyanov Institute of Seismology, Uzbekistan Academy of Sciences, 3 Zulfiyakhonum St, Tashkent 100128, Uzbekistan² Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Science, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

ABSTRACT. The current stress of Earth's crust in the territory of Uzbekistan has been studied using a focal earthquake mechanisms catalogue that includes the data provided by many authors. Stress reconstructions are based on the cataclastic analysis of displacements along fractures. For reconstructing the stress state at different depths of the crust in several seismically active regions of the study area, we consider a minimum number of earthquakes in a homogeneous sample equal to 6 and an averaging radius of 10 to 30 km within a single domain. The azimuths and dip angles of the principal stress axes, Lode – Nadai coefficients, geodynamic types of stress modes, relative (normalized to rock strength) values of maximum shear stresses, and effective pressure values are determined. Maps showing the spatial distribution of the studied parameters are constructed for both the entire seismically active layer and the depth layers. Stress fields are reconstructed and compared at two hierarchical levels based on the parameters of focal mechanisms of weak and moderate earthquakes ($M \leq 4.5$) and those of strong ($M \geq 5.0$) earthquakes. "Tectonic Stresses of Eurasia", the Internet resource created by IPE RAS, is used to visualize the stress field reconstructed from the data on strong ($M \geq 5.0$) earthquakes.

KEYWORDS: focal earthquake mechanism; stress field reconstruction; principal stress axis; stress ellipsoid; geodynamic types of stress regimes

FUNDING: This study was carried out as part of the State Assignment for the Institute of Physics of the Earth of RAS and the State Grant FA-F8-007 Fundamental Research of the Ministry of Innovative Development of the Republic of Uzbekistan.

RESEARCH ARTICLE

Received: May 7, 2020

Revised: August 27, 2020

Correspondence: Tatyana L. Ibragimova, tam.anay@yahoo.com

Accepted: September 14, 2020

FOR CITATION: Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A., Rebetsky Yu.L., 2021. The current stress of Earth's crust in the territory of Uzbekistan according to focal earthquake mechanisms. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3), 435–454. doi:10.5800/GT-2021-12-3-0532

СОВРЕМЕННОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ ТЕРРИТОРИИ УЗБЕКИСТАНА ПО ДАННЫМ СБОРНОГО КАТАЛОГА МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Т.Л. Ибрагимова¹, Р.С. Ибрагимов¹, М.А. Мирзаев¹, Ю.Л. Ребецкий²

¹ Институт сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АН РУз, 100128, Ташкент, ул. Зулфияхонум, 3, Узбекистан

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

АННОТАЦИЯ. Выполнено исследование современного напряженного состояния земной коры территории Узбекистана на основе сборного каталога механизмов очагов землетрясений из решений, полученных разными авторами. Инверсия природных напряжений проводилась методами катакластического анализа разрывных смещений. При минимальном числе землетрясений в однородной выборке, равном 6, и радиусе осреднения параметров от 10 до 30 км в пределах единичного домена для ряда сейсмоактивных областей территории Узбекистана получена послойная картина напряженного состояния массивов горных пород. Определены азимуты и углы погружения осей главных напряжений, значения коэффициента Лоде – Надаи, геодинамический тип напряженного состояния, относительные (нормированные на прочность сцепления массивов горных пород) величины максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления. Построены соответствующие карты площадного распределения указанных параметров как для всего сейсмоактивного слоя в целом, так и с дифференциацией по глубинам. Проведено сопоставление результатов реконструкции поля напряжений в двух иерархических уровнях, на основе параметров механизмов очагов слабых и умеренных землетрясений ($M \leq 4.5$), с аналогичными построениями, проведенными по сильным ($M \geq 5.0$) землетрясениям. Визуализация реконструкции поля напряжений по сильным ($M \geq 5.0$) землетрясениям проведена на базе интернет-платформы «Тектонические напряжения Евразии», разработанной в ИФЗ РАН.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: механизм очагов землетрясений; реконструкция поля напряжений; оси главных напряжений; эллипсоид напряжений; тип геодинамического режима

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН и государственного гранта фундаментальных исследований ФА-Ф8-007 Министерства инновационного развития Республики Узбекистан.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения сейсмической безопасности территории Узбекистана, характеризующейся сложным тектоническим строением и высоким уровнем сейсмической активности, становится все более актуальной, в том числе за счет повышения уровня урбанизации и увеличения крупных городских агломераций.

В решении многих задач, связанных с оценкой сейсмической опасности сейсмоактивных территорий и прогнозом сильных землетрясений, чрезвычайно важны сведения о напряженно-деформированном состоянии (НДС) сейсмогенерирующих структур земной коры, которое формируется в результате происходящих геодинамических процессов. Значительную информацию о напряжениях, снимаемых в момент землетрясения, и кинематике разрывов несут данные о механизмах очагов землетрясений. Усилиями ряда ученых [Riznichenko, 1985; Yunga, 1990; Rebetsky, 2003; и др.] к настоящему времени разработаны различные методы реконструкции – инверсии напряженно-деформированного состояния земной коры, основанные на интерпретации распределения в пространстве азимутов и углов погружения осей главных снимаемых напряжений P и T в совокупности очагов землетрясений, попадающих в элементарные объемы земной коры, и проведены расчеты для ряда сейсмоактивных регионов.

В рамках методологического подхода Ю.В. Ризниченко [Riznichenko, 1985] расчет компонент тензора скорости сеймотектонической деформации при сейсмическом течении горных масс территории Восточного Узбекистана по данным механизмов очагов землетрясений, произошедших в период с 1960 по 1984 г., сделан в работе [Seiduzova, Matasova, 1985]. Оценка напряженного состояния земной коры территории Средней Азии в целом, куда относится и территория Узбекистана, в рамках подхода С.Л. Юнга проводилась как самим автором данного метода [Yunga, 1990], так и его многочисленными последователями. Здесь особо следует остановиться на большом цикле исследований сеймотектонической деформации, выполненном коллективом авторов в 1979–1988 гг. Этот коллектив был сформирован в начале 1979 г. в рамках межведомственной рабочей группы секции МСССР по Средней Азии и Казахстану на базе Института сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Таджикской ССР. В состав группы входили ведущие специалисты сейсмологических центров союзных республик, занимающиеся определением механизмов очагов землетрясений и их интерпретаций при оценке напряженного состояния земной коры региона. Результатом работы этой группы явилось создание Каталога фокальных механизмов землетрясений Средней Азии и Казахстана с $M \geq 3.5$ за 1979–1988 гг. и полученные на его основе оценки

НДС земной коры Средней Азии. Эти исследования были отражены в серии публикаций в специализированных журналах «Землетрясения Средней Азии и Казахстана (1979–1988 гг.)» и «Землетрясения в СССР (1979–1988 гг.)» [Abdukadyrov et al., 1980; Lukk et al., 1988; и ряд др.] (более 15 статей).

За последние 25–30 лет на фоне обилия работ регионального плана по изучению напряженно-деформированного состояния земной коры территории Центральной Азии на основе анализа механизмов очагов землетрясений (МОЗ), проведенных с различных методологических позиций [Kuznetsova et al., 1995; Kuchai, Bushenkova, 2009; Sadykova, 2012; Rebetsky et al., 2010, 2012; и ряд др.], библиография работ по изучению НДС территории Узбекистана на детальном уровне, к сожалению, весьма скудна. Эти исследования в последние десятилетия проводились на основе анализа геологических индикаторов напряжений [Umurzakov, 2010; и др.] методами лабораторного [Turapov et al., 2000] и математического [Atabekov, 2020] моделирования тектонических процессов. Отсутствие за последние десятилетия работ по оценке напряженного состояния территории Узбекистана на основе анализа МОЗ во многом связано с тем, что здесь, как и в ряде других стран постсоветского пространства, бытовало отношение «...к задаче определения механизмов очагов землетрясений как к некой побочной, вторичной проблеме» [Rebetsky, 2020] и длительное время (более 20 лет) массовые определения параметров механизмов очагов не проводились.

За последние годы ситуация коренным образом стала меняться, что, прежде всего, связано с усилением в науке роли фундаментальных исследований. Это находит отражение в создании материально-технической базы научных исследований (расширение сети цифровых сейсмических станций), восстановлении прерванных научных связей с ведущими в данном направлении мировыми школами, приобщении к проблеме уже сформировавшихся специалистов в смежных областях знаний и молодых научных кадров. Возобновилось и массовое определение механизмов очагов землетрясений с магнитудой $M \geq 3.5$.

Вместе с тем накопление новых экспериментальных данных по фокальным механизмам очагов землетрясений – процесс длительный (землетрясения в низкосейсмичной части Туранской плиты, тектоно-физическая картина деформирования которой представляет значительный научный интерес, не происходят столь часто), поэтому собранные из различных источников данные по определениям фокальных механизмов очагов землетрясений изучаемой территории весьма ценны.

Настоящая статья продолжает исследования, начатые в статье [Rebetsky et al., 2020], в которых на основе сборного каталога МОЗ, составленного по данным различных авторов, алгоритмом метода катакластического анализа разрывных смещений (МКА) [Rebetsky, 2003] были реализованы два этапа реконструкции поля

природных напряжений на различных уровнях площадной детальности осреднения параметров и при различной магнитудной иерархии рассматриваемых землетрясений. В упомянутой работе удалось получить генерализованную картину напряженного состояния массивов горных пород практически для всей сейсмоактивной части территории Узбекистана при вариации радиуса осреднения параметров от 15 до 60 км для единичной ячейки и минимальном числе фокальных механизмов, попадающих в однородную выборку сейсмических событий, равном 5. Для отдельных областей исследуемой территории на двух иерархических уровнях рассматриваемых землетрясений ($M \leq 4.5$ и с $M \geq 5.0$) была проведена реконструкция напряжений с более высоким уровнем детальности – при радиусе осреднения от 10 до 30 км в пределах единичного домена и минимальном числе землетрясений в однородной выборке, равном 6. Установленные различия в параметрах напряженного состояния, полученные при привлечении землетрясений различного магнитудного уровня, связывались с различной глубиной слоев земной коры, в пределах которых реализуются слабые и сильные сейсмические события.

В данной работе для ряда сейсмоактивных областей территории Узбекистана получена послойная картина напряженного состояния массивов горных пород, а все проведенные алгоритмом МКА инверсии напряжений осуществлены при минимальном числе землетрясений в однородной выборке, равном 6, и радиусе осреднения параметров напряженного состояния в пределах единичного домена от 10 до 30 км, т.е. с большой степенью площадной детальности и высокой точностью определения параметров НДС.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуемая территория (рис. 1) располагается в центральной части Западного Тянь-Шаня, между Центрально-Казахстанским щитом и Туранской плитой Урало-Сибирской платформы на севере и западе, Таримским блоком на востоке и Индийской платформой на юге [Ulomov, 1974]. Восточная часть исследуемого района включает в себя горные системы Тянь-Шаня, Алая и Памира. К юго-западу от Узбекистана расположен Копетдагский горный массив Туркмено-Хорасанской горной системы [Ulomov, 1974].

Геологические структуры Западного Тянь-Шаня (рис. 2) существенно различаются по рельефу, геологическому строению и истории геологического развития. На востоке они представлены высокими горными складчатыми сооружениями, состоящими из палеозойских образований, и межгорными и предгорными впадинами, покрытыми мезозойскими и кайнозойскими отложениями. На западе эти отложения с меньшей мощностью охватывают обширные равнины эпипалеозойской Туранской плиты, а палеозойские породы местами выступают в виде возвышенностей небольшого размера в пределах Кызылкумов.

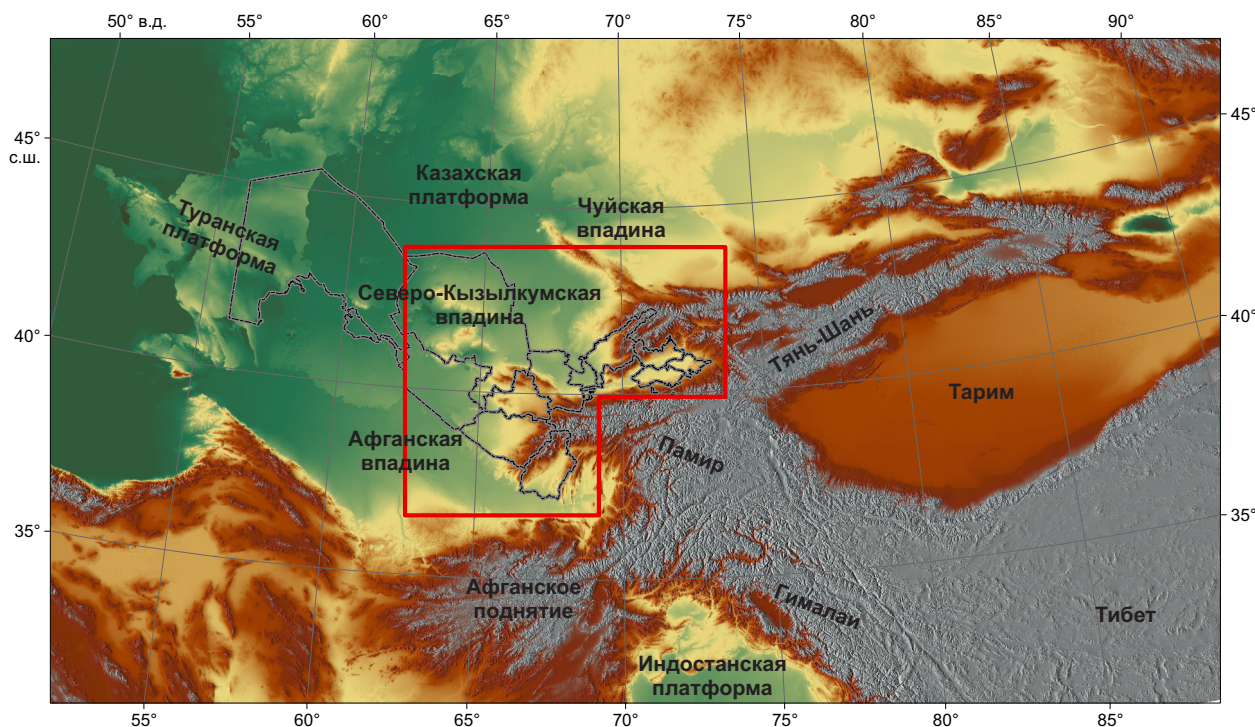


Рис. 1. Расположение района исследований в общей структуре района Высокой Азии.

Fig. 1. Schematic map showing the general structure of High Asia and the location of the study area.

В пределах Туранской плиты выделяются Амударьинская, Сырдарьинская и Приаральская впадины. В эпиплатформенную орогеническую область входит система положительных и отрицательных структур, выраженных в рельефе в виде горных хребтов (Чаткало-Кураминских, Алай-Туркестанских, Зеравшан-Гиссарских и др.), межгорных (Ферганская, Сурхандарьинская) и предгорных (Ташкентско-Голодностепская, Кашкадарьинская) впадин и разделяющих их зон разрывных нарушений [Ibragimov et al., 2002].

По геолого-геофизическим данным в пределах исследуемой территории мощность земной коры меняется от 40 км на северо-западе (район Приаралья) до 55 км (Ферганская долина).

На рис. 3 приведена карта эпицентров землетрясений исследуемого района, построенная по каталогу, составленному в Институте сейсмологии АН РУз. Каталог включает в себя параметры исторических и инструментальных землетрясений. В качестве основной характеристики для классификации землетрясений по величине в региональном каталоге используется энергетический класс землетрясений K , определяемый по сумме амплитуд объемных P - и S -волн, зарегистрированных короткопериодной аппаратурой [Rautian, 1960; Rautian et al., 2007]. Энергетический класс связан с высвобожденной при землетрясениях сейсмической энергией E зависимостью $K = \lg E$ (Дж). Переход от энергетического класса K к локальной (Рихтеровской) магнитуде M_L (в дальнейшем тексте просто M) и моментной магнитуде M_w , используемой в СМТ каталоге МОЗ (Harvard Global Centroid Moment Tensor Catalog), осуществляется

на основе зависимостей [Mukambaev, Mikhailova, 2014] для территории Средней Азии.

Распределение эпицентров сильных землетрясений по площади (рис. 3) весьма неравномерное. К востоку от Западно-Тянь-Шаньского линеймента, являющегося границей между горными сооружениями Тянь-Шаня и равнинной территорией Туранской плиты, сейсмическая активность как на уровне слабых и умеренных сейсмических событий (синие кружки на карте), так и на уровне сильных землетрясений (красные кружки) очень высокая, а западнее этого линеймента – низкая [Artikov et al., 2020]. Повышенной плотностью эпицентров сильных землетрясений в Западном Узбекистане характеризуются районы Газли и Бухары. Несколько сильных землетрясений отмечено в районе Центральных Кызылкумов.

Подавляющее большинство сильных землетрясений исследуемого региона происходит в достаточно узких протяженных зонах, ассоциированных с глубинными разломами земной коры. Размеры блоков, разграниченных разломами, контролируют магнитуду максимально возможных землетрясений, происходящих в пределах этих сейсмоактивных зон. На основе сейсмологических и сеймотектонических данных в работах [Artikov et al., 2017, 2018] выделено девять сейсмоактивных зон, направление которых совпадает с простираем крупных геотектонических структур, способных генерировать землетрясения с магнитудой $M \geq 5.0$ (рис. 3).

В пределах перечисленных сейсмоактивных зон выделяются участки, в которых как в историческом периоде времени, так и в инструментальном периоде

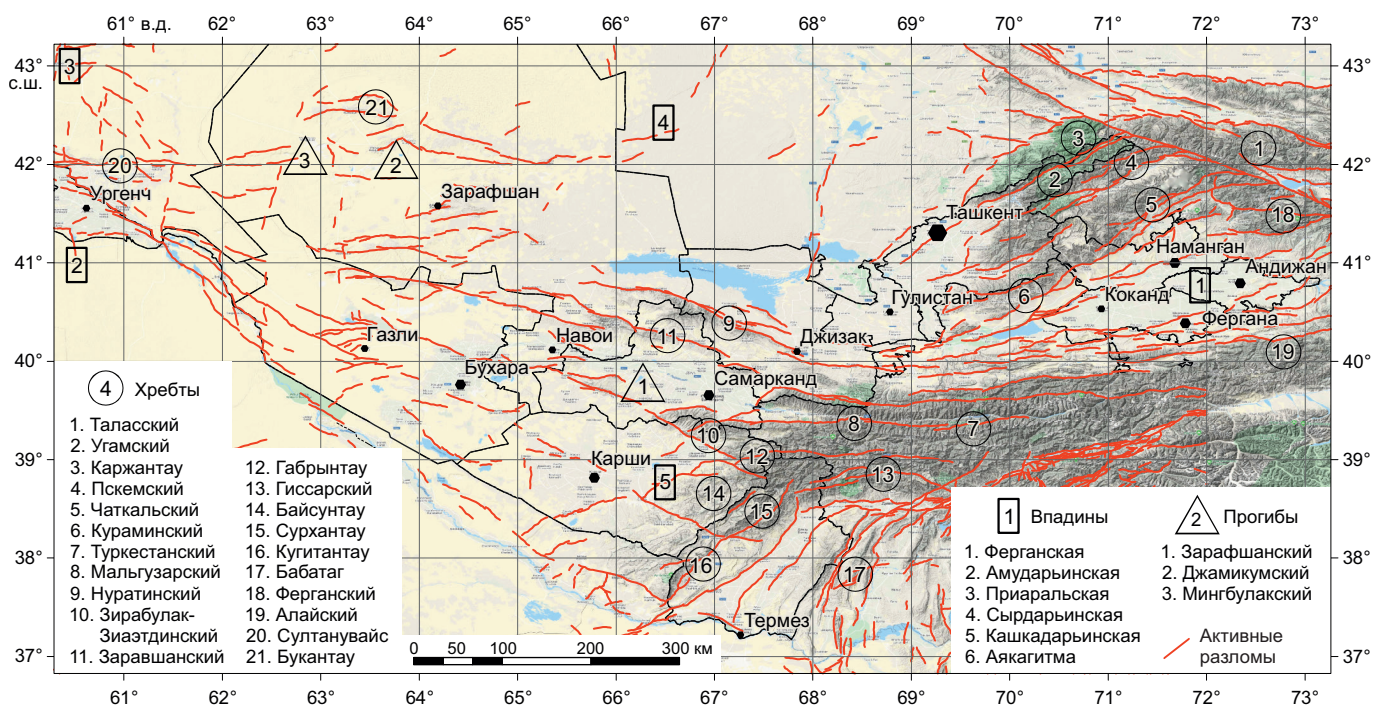


Рис. 2. Современный структурный план исследуемого района и активные разломы земной коры (по [Bachmanov et al., 2017]).

Fig. 2. Schematic map showing the modern structural plan of the study area and active faults of the crust (after [Bachmanov et al., 2017]).

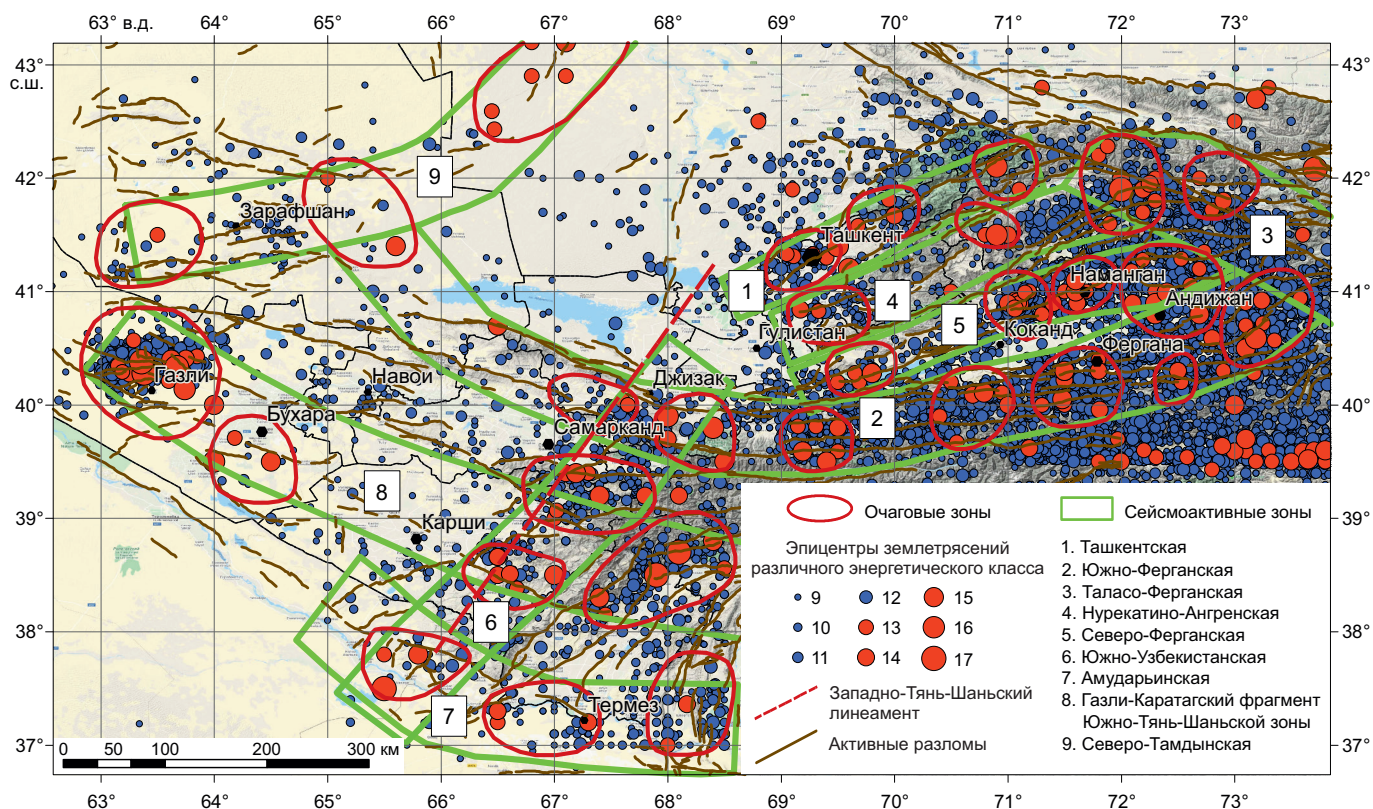


Рис. 3. Карта эпицентров исторических и инструментальных землетрясений с энергетическим классом K=9-17 (M=2.5-7.5) территории Узбекистана с указанием местоположения основных сейсмоактивных зон и областей с высокой концентрацией сильных землетрясений.

Fig. 3. Map of the territory of Uzbekistan showing historical and instrumental earthquake epicenters, K=9-17 (M=2.5-7.5), and the main seismically active regions and zones with a high concentration of recorded strong earthquakes.

наблюдений сейсмическая активность на уровне сильных землетрясений была весьма высокой. Сопоставление карт эпицентров землетрясений, построенных за различные временные интервалы (до 1900 г. и начиная с инструментального периода), показывает, что выделенные области с высокой концентрацией сильных землетрясений достаточно устойчиво сохраняют свою конфигурацию, что свидетельствует о наличии в них благоприятных условий для крупномасштабного разрушения в поле действующих тектонических напряжений. В связи с малой изменчивостью в течение десятков и сотен лет направленности протекания сеймотектонических процессов, определяющих современное напряженное состояние сейсмоактивных структур, эти участки интенсивного дробления земной коры рассматриваются как наиболее вероятные области ожидаемой сейсмической активизации на ближайшие десятилетия [Artikov et al., 2017, 2018], поэтому одной из задач проводимого исследования являлось определение особенностей природного напряженного состояния областей, в которых реализуются сильные землетрясения. В этой связи следует упомянуть исследование [Rebetsky, Kuzikov, 2016] по Северному Тянь-Шаню, в котором по результатам реализации четырех этапов реконструкции напряжений МКА выявлены участки активных разломов, наиболее благоприятные для возникновения сильных землетрясений.

Подобные подходы опираются на оценку уровня кулоновых напряжений на разломах (slip tendency) [Morris et al., 1996] и предусматривают наличие данных не только о напряжениях, но и об углах погружения разломов.

3. КАТАЛОГ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

При формировании базы данных механизмов очагов землетрясений, наряду с построениями, опубликованными в сборниках «Землетрясения Средней Азии и Казахстана» (1979–1988), использовались следующие источники:

- определения механизмов очагов сильных ($M \geq 5.0$) землетрясений, произошедших на территории Узбекистана и прилегающих к нему территориях в период с 1946 по 1985 г., проведенные Е.М. Безродным и изложенные в его монографии [Bezrodny, Tuychiev, 1987];
- выборка по территории Узбекистана из каталога механизмов очагов землетрясений Центральной Азии с энергетическим классом $K \geq 10$ ($M \geq 3.5$) за период с 1970 по 2005 г. (авторы каталога Н.Н. Михайлова, Н.Н. Полешко), предоставленная заместителем директора по научной работе Института геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан Н.Н. Михайловой;

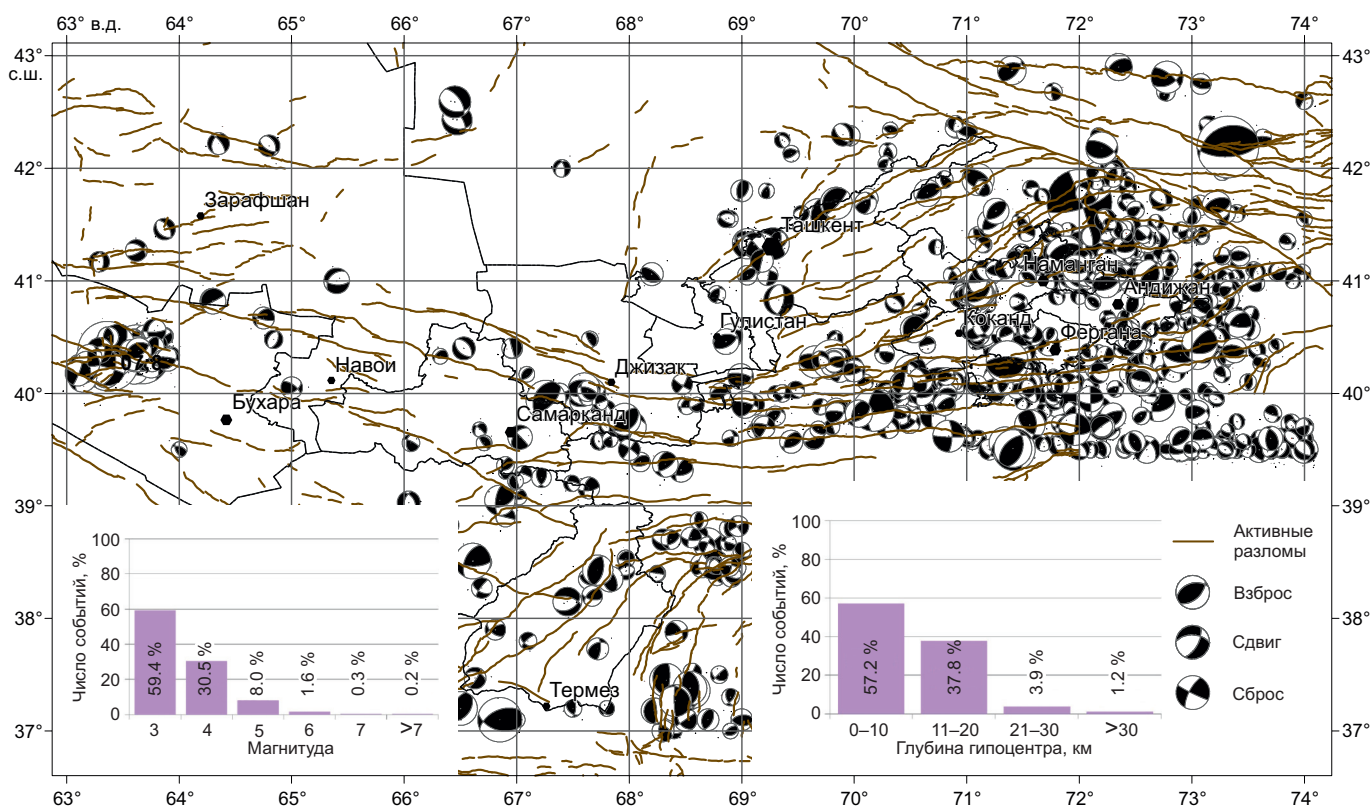


Рис. 4. Карта механизмов очагов землетрясений, вошедших в сводный каталог механизмов очагов землетрясений территории Узбекистана, и гистограммы распределения событий каталога по магнитуде и глубине.

Fig. 4. Map of earthquake focal mechanisms, and histograms showing the distribution of the analysed events by magnitude and depth, based on the data from the consolidated catalogue of earthquake focal mechanisms of the Uzbekistan territory.

– выборка механизмов очагов землетрясений с магнитудой $M \geq 3.0$ по территории, ограниченной координатами $37-43^\circ$ с.ш., $63-74^\circ$ в.д., за период с 1946 по 1992 г. из каталога Института физики Земли РАН. Для ряда землетрясений в данном каталоге приведено несколько решений, полученных разными авторами;

– Гарвардский каталог механизмов очагов сильных ($M \geq 5.0$) землетрясений CMT [Eksrom, Nettles, 2014] с 1976 г. по настоящее время.

В результате унификации исходных данных, анализа различных решений для одних и тех же сейсмических событий и выбора среди них единственного наиболее вероятного был сформирован единый каталог механизмов очагов землетрясений территории Узбекистана, включающий 1157 сейсмических событий [Rebetsky et al., 2020]. Карта эпицентров землетрясений, вошедших в сводный каталог, с изображением механизмов очагов этих землетрясений показана на рис. 4. На этом же рисунке приведены гистограммы распределения землетрясений сборного каталога МОЗ территории Узбекистана по магнитуде и глубине.

Роза-диаграммы распределения в пространстве азимутов и углов погружения осей, снимаемых в момент землетрясения напряжений растяжения (T) и сжатия (P), для всего исследуемого района в целом и для отдельных областей приведены на рис. 5. Как это видно из рисунка, для всей территории Узбекистана преобладает близмеридиональное направление оси сжатия и близширотное – оси растяжения. Азимут оси T имеет несколько больший разброс, чем оси P . Анализ углов погружения осей P и T свидетельствует о том, что для большинства сейсмических событий первая из них субгоризонтальна, а вторая – субвертикальна. Таким образом, характер распределения в пространстве осей P и T в очагах слабых и умеренных землетрясений (а именно эти события в сводном каталоге составляют подавляющее большинство) для всей исследуемой территории согласуется с этими же характеристиками, определенными ранее [Bezrodny, Tychiev, 1987] по механизмам очагов сильных землетрясений. Вместе с тем распределение этих же параметров для отдельных районов (рис. 5) показывает их существенную вариабельность.

На рис. 6 показано площадное распределение землетрясений сводного каталога механизмов очагов землетрясений по различным кинематическим типам разрыва в очаге в соответствии с классификацией, предложенной в работе [Rebetsky, 2003]. На исследуемой территории встречаются все типы механизмов очагов, но преобладающими являются взбросы и взбросо-сдвиги. Этим типам механизмов очагов отвечает близгоризонтальное положение оси сжатия P и близвертикальное положение оси растяжения T . Значительная часть сбросов и сбросо-сдвигов в восточной части территории находится в пределах узкой Алайской долины, расположенной между Южно-Ферганским и Южно-Тянь-Шаньским разломами, в центральной части Таласо-Ферганского разлома и в пределах Ферганской

межгорной впадины. На платформенной части исследуемой территории сбросы отмечаются на северо-западе в пределах Сырдарьинской впадины, где в 1968 г. произошел высокомагнитудный рой Кызылкумских землетрясений.

Значительное число сбросов и сбросо-сдвигов можно увидеть в Газлийской очаговой зоне. Этому типу механизмов отвечает субгоризонтальное положение оси растяжения T и субвертикальное положение оси сжатия P . Землетрясения сдвигового типа, для которых характерно субгоризонтальное положение осей P и T , встречаются весьма редко. То же самое можно сказать и о механизмах типа взреза (поддвига).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Реконструкция природных напряжений по данным механизмов очагов землетрясений осуществлялась с помощью программы STRESSseism и алгоритма МКА, разработанного в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН [Rebetsky, 2003]. Расчеты выполнялись по сетке $0.1 \times 0.1^\circ$, а радиус круговой области, в пределах которой проводилось осреднение параметров, составлял от 10 до 30 км. Минимальный размер однородной выборки в каждом исследуемом домене включал не менее шести определений механизмов, что, с одной стороны, несколько уменьшило площадь, на которой реконструкция оказалась возможной, с другой – обеспечило высокую точность построений в областях, в которых реконструкцию осуществить удалось. Исходя из распределения землетрясений по глубинам, отдельные построения проведены для всего сейсмоактивного слоя, верхней части земной коры (до 10 км) и слоя, расположенного ниже 10 км. При полумагнитудной классификации землетрясений по величине реконструкция осуществлялась отдельно по механизмам очагов слабых и умеренных землетрясений с $M \leq 4.5$ и по сильным землетрясениям с $M \geq 5.0$.

В рамках алгоритма МКА проведены два этапа реконструкции поля природных напряжений, позволившие для каждого домена определить азимуты и углы погружения осей главных напряжений, значения коэффициента Лоде – Надаи, геодинамический тип напряженного состояния, относительные (нормированные на прочность сцепления массивов горных пород) величины максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления на плоскости хрупкого разрыва.

Заметим, что в алгоритме МКА используется правило знаков напряжений, принятое в классической механике, т.е. сжимающие напряжения отрицательны, а растягивающие – положительны. В силу этого главные напряжения σ_1 являются минимальными сжимающими, а σ_3 – максимальными сжимающими. При интерпретации ориентации осей главных напряжений для σ_1 мы будем использовать термин «главное растяжение» (имея в виду девиаторную составляющую этого напряжения), а для σ_3 – «главное сжатие».

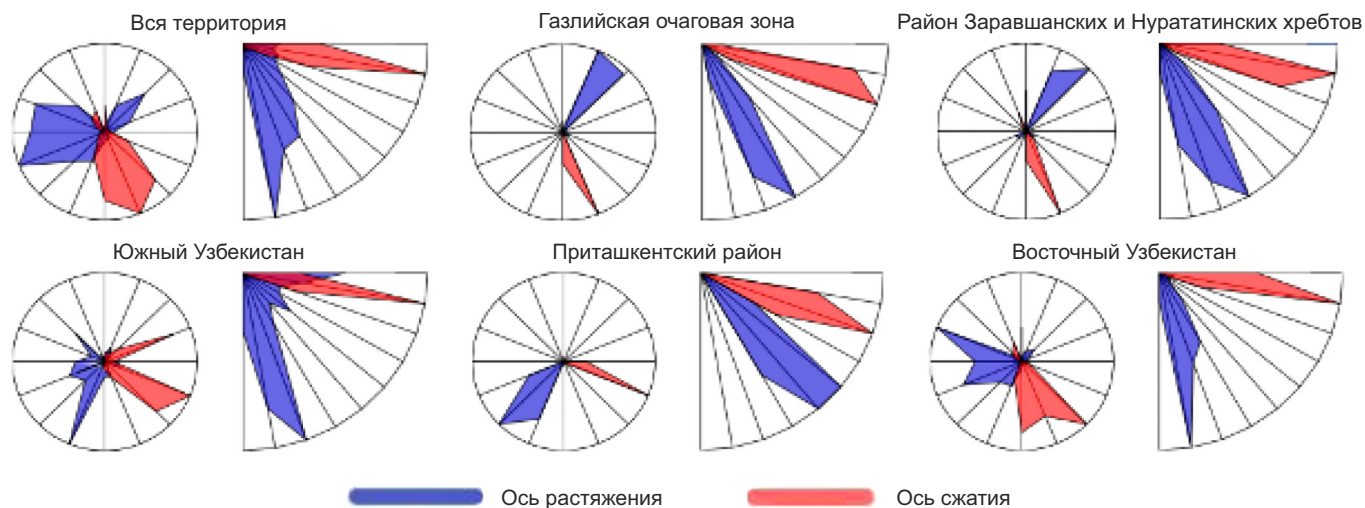


Рис. 5. Роза-диаграммы азимутов и углов погружения осей сжатия (P) и растяжения (T) в очагах землетрясений территории Узбекистана.

Fig. 5. Rose diagrams of azimuths and dip angles of compression (P) and extension (T) axes in earthquake sources, Uzbekistan.

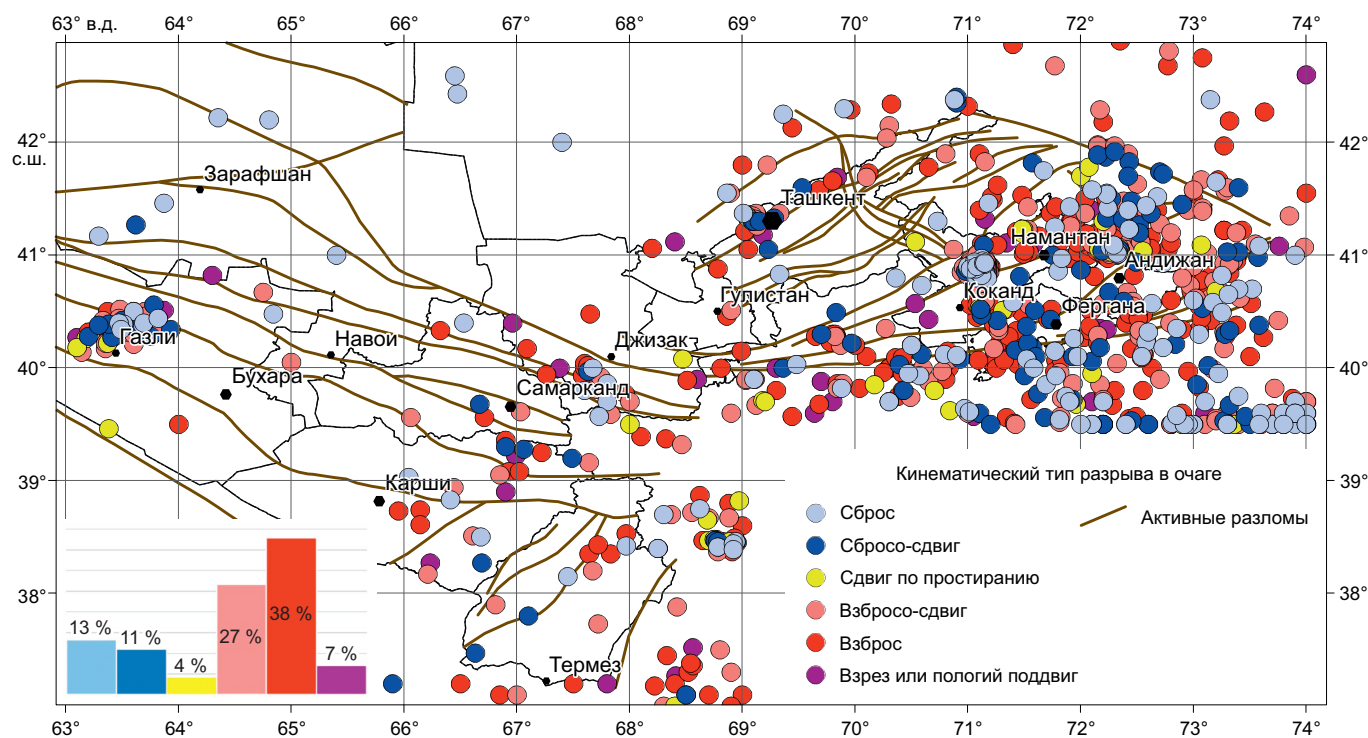


Рис. 6. Распределение по площади землетрясений с различным кинематическим типом разрыва в очаге (по [Rebetsky, 2003]).

Fig. 6. Spatial distribution of earthquakes with different kinematic types of fracturing (after [Rebetsky, 2003]).

Параметры эллипсоида напряжений. На рис. 7, 8, 9 показаны проекции на горизонтальную плоскость осей главных сжимающих (σ_3) и растягивающих (σ_1) напряжений для тех доменов, в которых удалось провести реконструкцию. Построения сделаны как для сейсмоактивного слоя в целом, так и с дифференциацией его по глубинам. В нижнем левом углу каждого рисунка приведены роза-диаграммы азимута и угла погружения осей главных напряжений. Как это следует из рисунков, угол погружения оси минимального

сжатия σ_1 существенно меняется с глубиной. На малых глубинах (0–10 км) отмечается большой разброс в углах погружения оси σ_1 (от 0 до 80°). На глубинах больше 10 км для большинства доменов ось σ_1 субвертикальна. Наибольшие вариации азимута оси минимального сжатия с увеличением глубины отмечаются в районе Алайского хребта (от субширотного на малых глубинах до субмеридионального на больших) и в восточной части Газлийской очаговой зоны (от северо-восточного до строго меридионального).

Угол погружения оси главного сжатия σ_3 ведет себя более стабильно при изменении глубины сейсмоактивного слоя. Как для сейсмоактивного слоя в целом, так и для различных глубин у большинства доменов ось σ_3 близгоризонтальна. На малых глубинах в районе Алайского хребта можно отметить ее близвертикальное погружение. В большинстве случаев простираение оси максимального сжатия практически перпендикулярно направлению структур. Эта особенность

нарушается для юго-восточной части Таласо-Ферганского разлома, где направления оси σ_3 и разлома практически совпадают.

Анализ распределения коэффициента Лодэ – Надаи, рассчитанного для всего сейсмоактивного слоя (рис. 10, а), свидетельствует о неоднородности соотношения величин главных напряжений в земной коре исследуемой территории. При преобладающем числе доменов, характеризующихся состоянием, близким

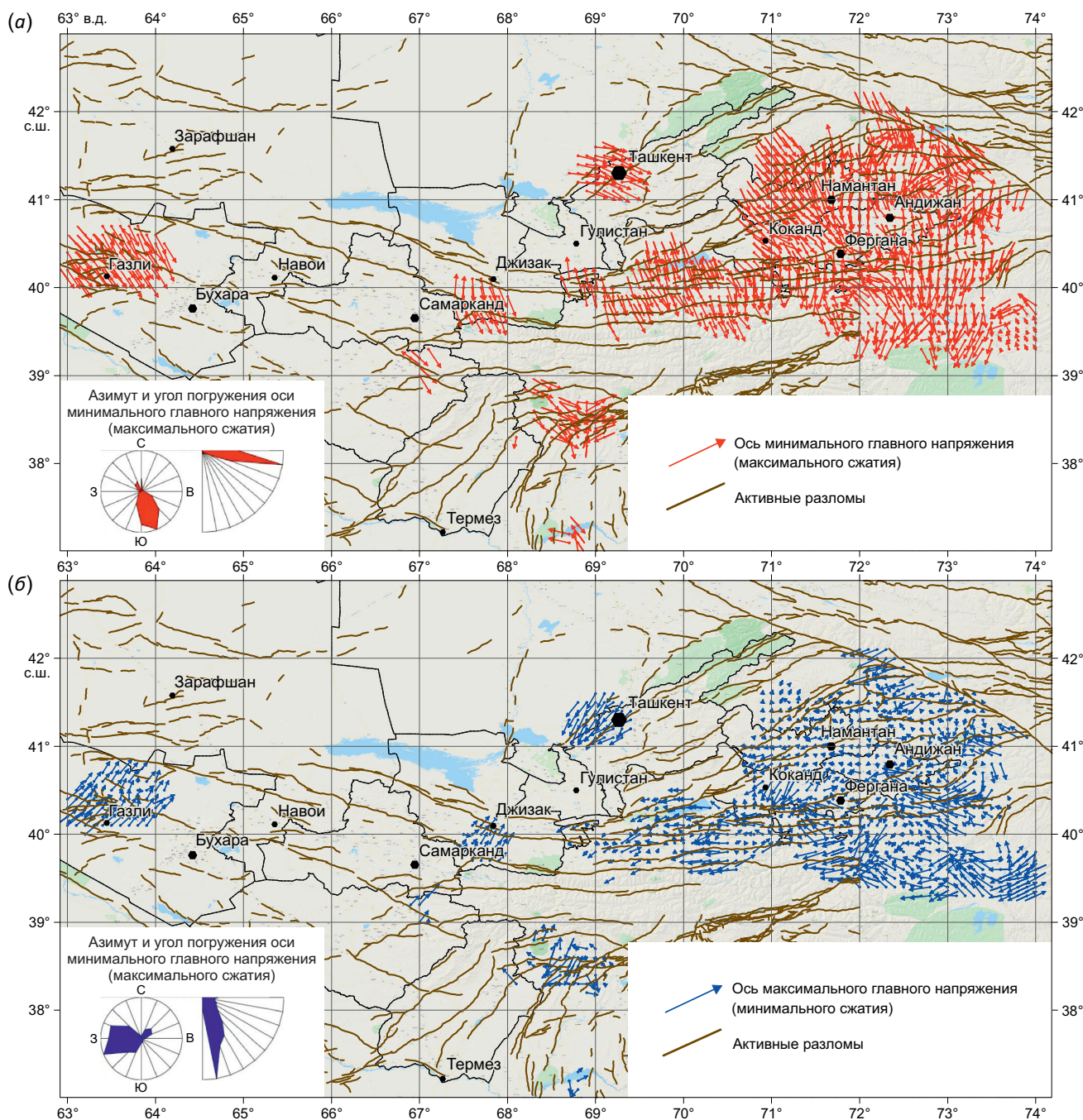


Рис. 7. Проекция на горизонтальную плоскость осей: (а) – алгебраически минимальных главных напряжений (максимального сжатия) σ_3 ; (б) – алгебраически максимальных главных напряжений (минимального сжатия) σ_1 для всего сейсмоактивного слоя.

Fig. 7. Projections to the horizontal plane of axes for the entire seismically active layer: (a) – algebraically minimal principal stress (maximum compression), σ_3 ; (b) – algebraically maximum principal stress (minimum compression), σ_1 .

к чистому сдвигу ($0.2 < \mu_\sigma < 0.2$), значительное число доменов характеризуется напряженным состоянием, смещенным в сторону одноосного сжатия (район Газли, область сочленения Южно-Ферганского и Северо-Ферганского разлома, отдельные участки в пределах Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоны). Области, в которых напряженное состояние приближено к одноосному растяжению, расположены в Приташкентском районе, а также в северо-восточной части Северо-Фер-

ганского и Южно-Ферганского разломов и одноименных флексурно-разрывных зон.

Характер распределения коэффициента Лодэ – Надаи существенно меняется с глубиной (рис. 10, б, в). Если для небольших глубин (0–10 км) преобладающим является чистый сдвиг, то с увеличением глубины домены с напряженным состоянием, приближенным к одноосному сжатию, одноосному растяжению и к чистому сдвигу, распределены примерно в равных долях.

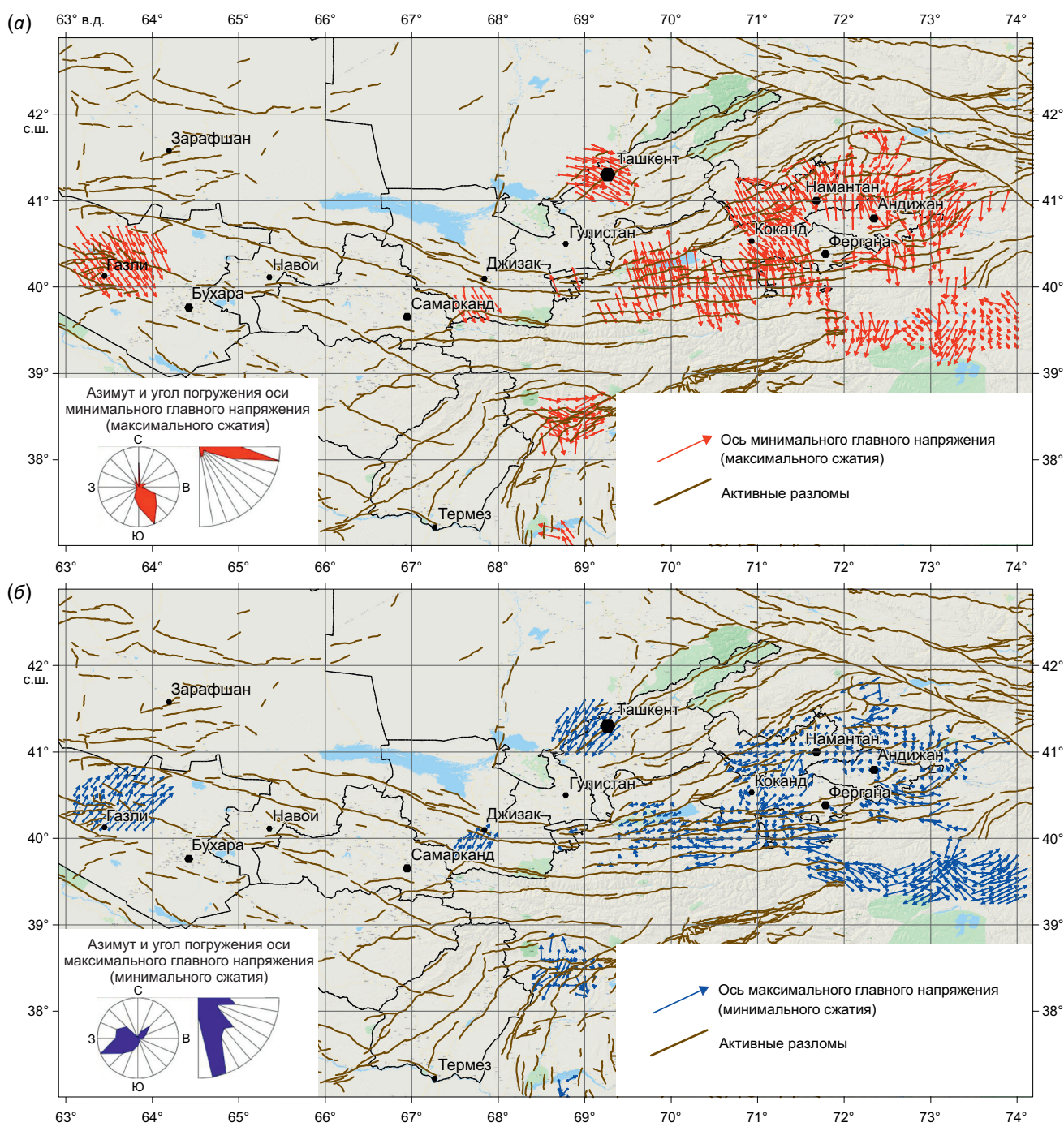


Рис. 8. Проекция на горизонтальную плоскость осей: (а) – максимального сжатия σ_3 ; (б) – минимального сжатия σ_1 (главного девиаторного растяжения) для глубин $H=0-10$ км.

Fig. 8. Projections to the horizontal plane of axes for the depths of 0–10 km: (a) – maximum compression, σ_3 ; (б) – minimum compression, σ_1 (main deviatoric extension).

При этом большая часть доменов с напряженным состоянием, близким к одноосному растяжению, располагается в пределах Ферганской межгорной впадины. На глубинах до 10 км в Газлийской очаговой зоне значения коэффициента Лодэ – Надаи близки к нулю, что характерно для состояния чистого сдвига, а на больших глубинах отмечаются высокие значения параметра μ , что соответствует одноосному сжатию.

Районирование территории по геодинамическим типам напряженного состояния. Реконструкцию поля

напряжений для Приташкентского района по имеющимся данным удалось осуществить только в диапазоне глубин 0–10 км. Преобладающим для данной территории является тип напряженного состояния, сочетающий горизонтальное сжатие со сдвигом (рис. 11). Напряжения максимального сжатия σ_3 ориентированы в близширотном направлении, а напряжения минимального сжатия σ_1 имеют юго-юго-западное направление. Погружение осей σ_1 и σ_3 для большинства доменов Приташкентского района достаточно пологое. К западу

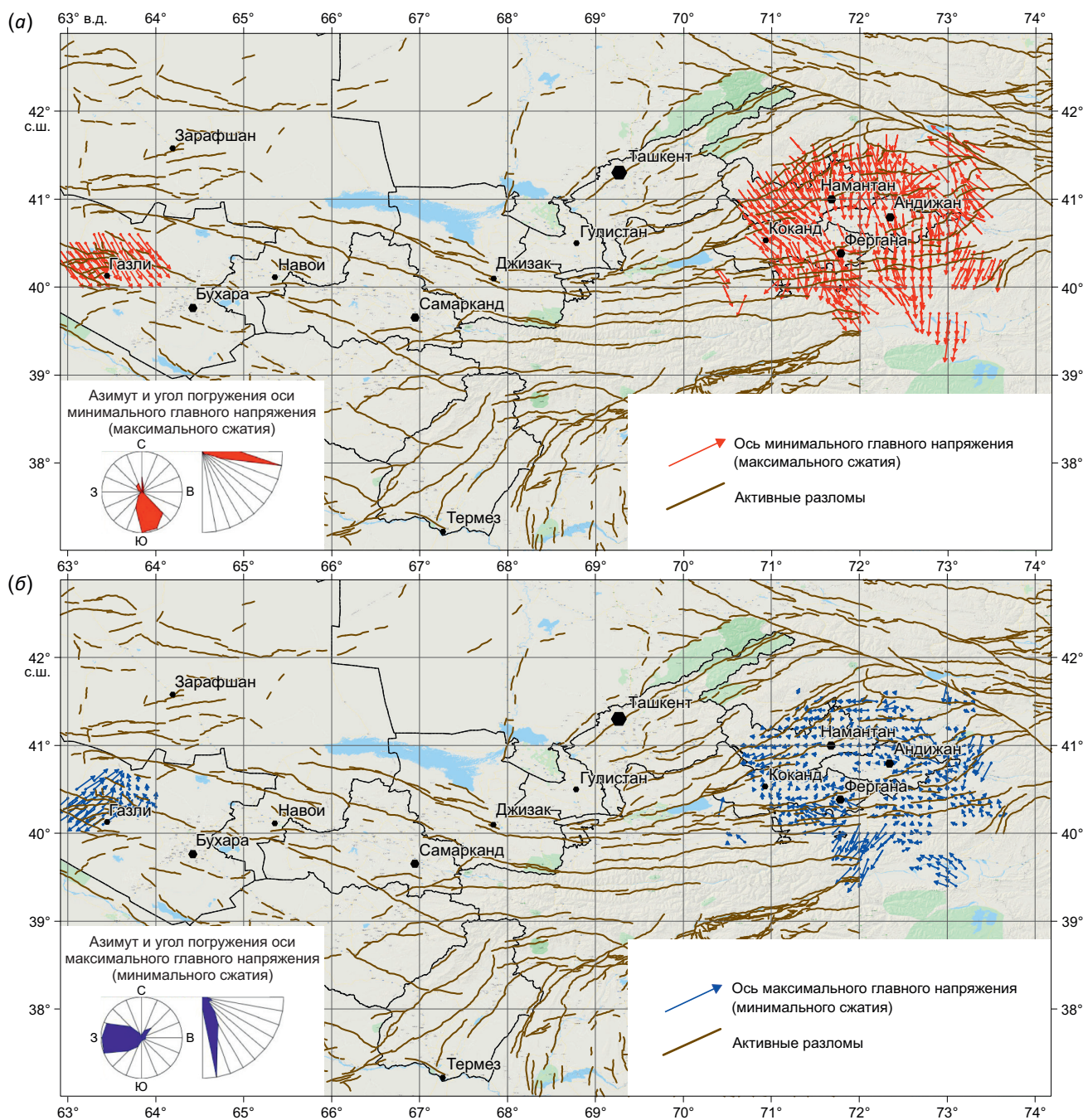


Рис. 9. Проекция на горизонтальную плоскость осей: (а) – максимального сжатия σ_3 ; (б) – минимального сжатия σ_1 для глубин $H=11-40$ км.

Fig. 9. Projections to the horizontal plane of axes for the depths of 11–40 km: (a) – maximum compression, σ_3 ; (b) – minimum compression, σ_1 .

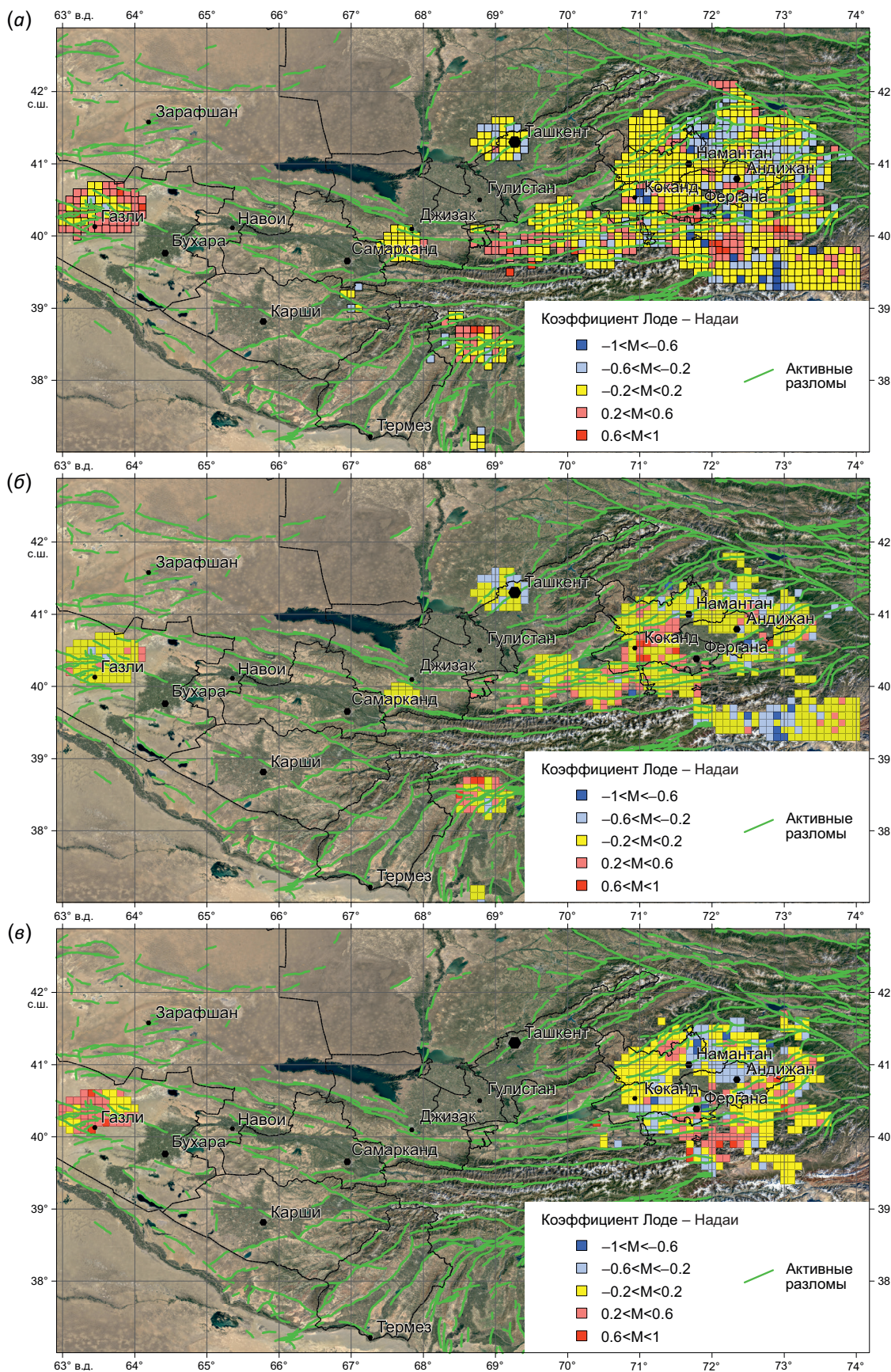


Рис. 10. Площадное распределение коэффициента Лодде – Надаи для (а) – всего сейсмоактивного слоя; (б) – для глубин $H=0-10$ км; (в) – для глубин $H=11-40$ км.

Fig. 10. Spatial distribution of the Lode – Nadai coefficient for the entire seismically active layer (a), and the depths of 0–10 km (b) and 11–40 km (c).

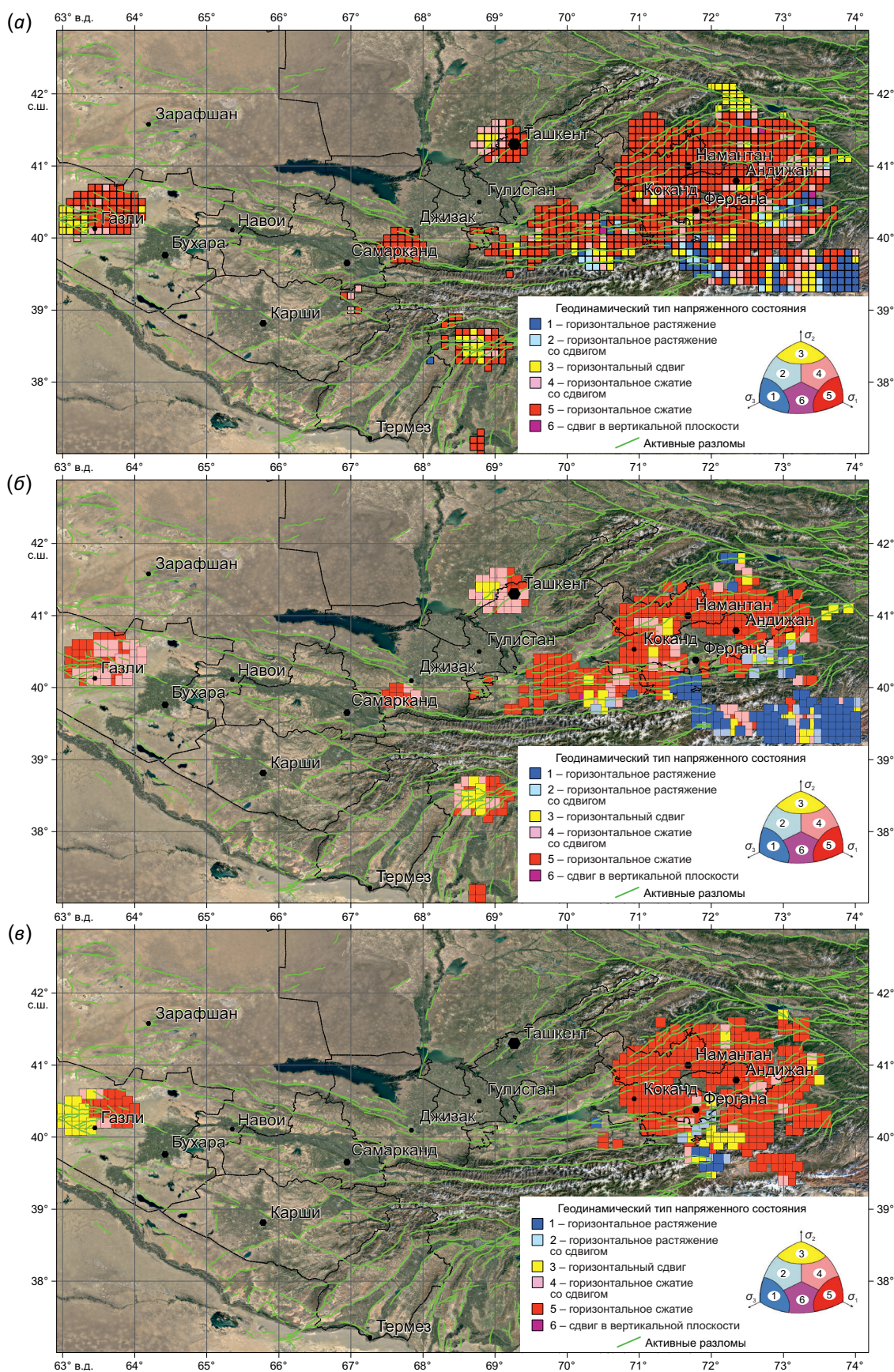


Рис. 11. Районирование территории по геодинамическим типам напряженного состояния: (а) – весь сейсмоактивный слой; (б) – Н=0–10 км; (в) – Н=11–40 км.

Fig. 11. Zoning of the territory of Uzbekistan by geodynamic types of stress state: (a) – entire seismically active layer; (б) – 0–10 km depth; (в) 11–40 km depth.

от Ташкента находится несколько доменов, характеризующихся режимом горизонтального сдвига.

Геодинамический тип напряженного состояния Газлийской очаговой зоны сильно меняется с глубиной. Для всего сейсмоактивного слоя в целом юго-западная часть зоны характеризуется режимом горизонтального сдвига, а восточная – горизонтального сжатия. На малых глубинах (0–10 км) западная часть зоны находится в режиме горизонтального сжатия, а восточная – в режиме горизонтального сжатия со сдвигом. На больших глубинах западная часть Газлийской очаговой зоны характеризуется режимом горизонтального сдвига, а восточная часть – горизонтального сжатия. Ось главного сжатия σ_3 ориентирована в юго-восточном направлении и практически близгоризонтальна для всех исследуемых доменов. Направление оси σ_3 слабо меняется с глубиной. Для оси минимального сжатия σ_1 картина существенно иная. С приближением к дневной поверхности для Газлийской очаговой зоны уменьшается разброс в вариациях азимутов и углов погружения. Ось ориентирована в северо-восточном направлении и имеет угол погружения порядка 30–40° к горизонту. Для больших глубин восточная часть Газлийской очаговой зоны ось максимального сжатия имеет ориентацию на север и практически близвертикальна.

В южной части Узбекистана (северная часть Баба-таг-Кейкитауской структуры) внутри области горизонтального сжатия выделяется значительная по размерам область горизонтального сдвига. При этом ось максимального сжатия σ_3 характеризуется близгоризонтальным погружением и практически везде ориентирована в широтном направлении вкост простирания Гиссарских структур. Напряжения минимального сжатия σ_1 в кольцевой части данной области, характеризующейся режимом горизонтального сжатия, практически близвертикальны при северо-западном простирании. В центральной части области, характеризующейся режимом горизонтального сдвига, ось σ_1 близгоризонтальна и ориентирована вдоль простирания Гиссарских структур.

В центральной и восточной части Ферганской межгорной впадины напряжения σ_1 близвертикальны. Западная часть впадины характеризуется близгоризонтальным погружением σ_1 и азимутом в направлении на юго-запад.

Практически для всех доменов Ферганской межгорной впадины максимальное сжатие σ_3 близгоризонтально. Для концевых участков впадины оси этого напряжения имеют меридиональное направление, а в центральной части впадины они ориентированы в юго-восточном направлении. Эта особенность прослеживается для различных глубин сейсмоактивного слоя. Без дифференциации сейсмоактивного слоя по глубинам практически вся Ферганская впадина характеризуется режимом горизонтального сжатия. В центральной части впадины отмечается несколько доменов, находящихся в режиме горизонтального сдвига.

Наибольшее число доменов, находящихся в режиме горизонтального сдвига, расположено в центральной и юго-восточной части Таласо-Ферганского разлома. В этих областях минимальное сжатие σ_1 имеет близширотное направление, а максимальное сжатие σ_3 – близмеридиональное. Оба напряжения здесь имеют пологое погружение.

Наибольшее число доменов, находящихся в режиме горизонтального растяжения, расположены за Алайским хребтом в пределах одноименной долины. В этих областях ось минимального сжатия σ_1 близгоризонтальна и ориентирована в направлении простирания Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоны, а ось максимального сжатия σ_3 имеет направление вкост структур и близвертикальна.

Геодинамический тип напряженного состояния исследуемой территории, так же как и коэффициент Лоде – Надаи, существенно меняется с глубиной. С увеличением глубины доля доменов, характеризующихся режимом горизонтального сжатия, становится больше.

Относительные величины максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления. Важным результатом второго этапа реконструкции напряжений МКА является определение относительных величин максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления (разность между давлением в горных породах и флюидным давлением трещинно-порового пространства $p^* = p - p_{\text{фл}}$, где $p = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$).

В рамках МКА предполагается, что в областях, характеризующихся высокой сейсмической активностью, массивы горных пород находятся в напряженном состоянии, близком к предельному. Из соотношений Кулона – Мора это определяет прямо пропорциональную связь между эффективными нормальными σ_n^* и касательными τ_n напряжениями на плоскости хрупкого разрыва [Rebetsky, 2003], а как следствие, близкое к этому соотношение между величинами p^*/τ_f и τ/τ_p , полученными нормированием значений p^* и τ на прочность сцепления массивов горных пород τ_f (в предположении, что последняя не сильно варьируется в пределах исследуемой территории).

На рис. 12 показано площадное распределение относительных величин эффективного давления p^*/τ_f для всего сейсмоактивного слоя и с дифференциацией по глубинам (в силу сказанного выше, поведение величины τ/τ_p аналогично изменениям p^*/τ_f и потому далее не приводится).

На платформенной части исследуемой территории наибольшие значения p^*/τ_f наблюдаются на периферии Газлийской очаговой зоны и на участке Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоны между Зирабулак-Зиаэтдинским и Габрынтауским хребтами. В зоне перехода от орогена к платформе значительное число доменов с повышенными значениями относительных величин эффективного давления расположено в При-ташкентском районе, непосредственно в пределах Каржантауской структуры. В орогенной части исследуемой

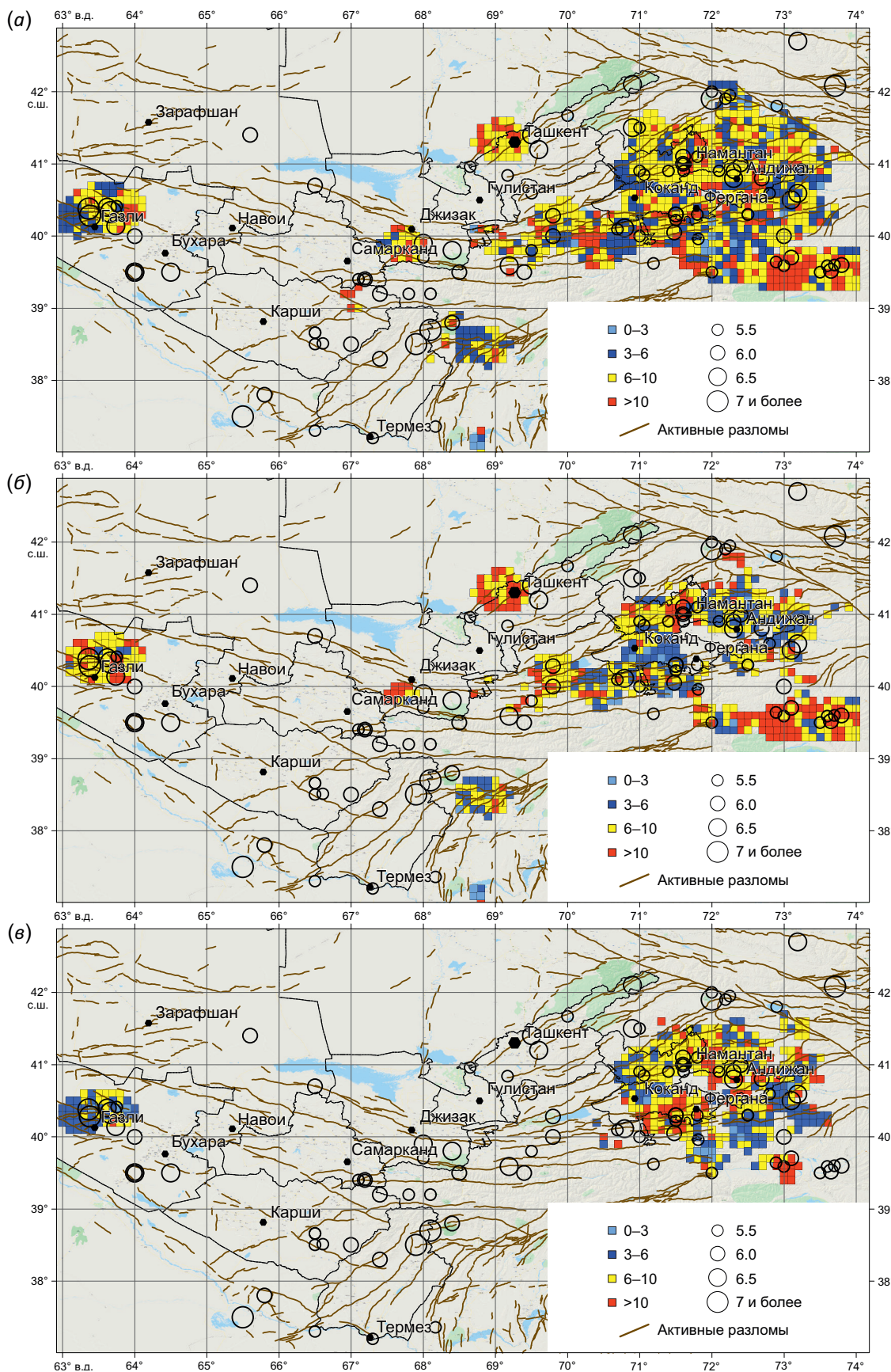


Рис. 12. Площадное распределение нормированной на прочность сцепления величины эффективного давления (p^*/τ_r) для (а) – всего сейсмоактивного слоя; (б) – глубин $H=0-10$ км; (в) – глубин $H=11-40$ км.

Fig. 12. Spatial distribution of effective pressure values (p^*/τ_r , normalized to rock strength) for the entire seismically active layer (a), and the depths of 0-10 km (b) and 11-40 km (c).

территории значительные по протяженности области повышенных значений p^*/τ_f отмечаются на участке Южно-Ферганского разлома, расположенном севернее Туркестанского хребта, а также в пределах Алайской долины. Последняя область устойчиво прослеживается на различных глубинах.

В работах [Rebetsky, 2007; Rebetsky, Tatevossian, 2013; Rebetsky et al., 2016] отмечается, что сильные землетрясения, как правило, происходят в областях с невысокими значениями эффективного всестороннего давления и максимальных касательных напряжений, что связано с тем, что в таких областях понижены значения сил трения на разрывах, а это создает благоприятные условия для крупномасштабного разрушения. С целью проверки данного положения в исследуемом регионе мы нанесли на карту нормированных значений эффективного давления эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq 5.5$, произошедших на территории Узбекистана начиная с исторических времен. В целом, характер распределения таких землетрясений не противоречит выводам этих работ, установленным при исследовании других сейсмоактивных регионов. Вместе с тем ограничение площади, для которой на основе имеющихся данных удалось провести реконструкцию, в особенности для сейсмоактивного слоя ниже 10 км, где в основном и реализуются сильные землетрясения, не позволяет в данном случае существенно сузить места областей ожидаемой сейсмической активизации. Однако привлечение этих данных, наряду с другими индикаторами современной геодинамической активности (сейсмический режим, деформации земной поверхности, зарегистрированные инструментальными методами и др.), может оказаться весьма полезным для анализа сейсмологической обстановки, в частности для

дифференциации асейсмичных областей от областей длительного сейсмического затишья.

Обращает на себя внимание тот факт, что большая часть разломов, ограничивающих Ферганскую долину с северо-запада и юго-востока, в верхней части коры проходит через зоны повышенного уровня эффективного давления. То же самое имеет место и для сегмента Южно-Тянь-Шаньского разлома к востоку от поселка Газли, а также юго-западного участка Приташкентской флексурно-разрывной зоны. При этом вдоль части этих тектонических нарушений имеются отдельные участки протяженностью до 20–30 км с пониженным уровнем эффективного давления, что говорит о потенциальной опасности генерации в их пределах землетрясений с магнитудой более 6.0. Отдельного внимания заслуживает участок, охватывающий северо-восточное окончание Бабатаг-Кейкитауской системы разломов север-северо-восточного простирания. Здесь отмечается достаточно обширная область средних и пониженных значений эффективного давления, что может говорить о возможности генерации землетрясений с магнитудой более 7.0. Для более конкретного тектонофизического районирования опасных разломов необходимы специальные исследования кулоновых напряжений на их поверхности, что требует данных об углах погружения разломов [Rebetsky, Kuzikov, 2016].

Представляет определенный интерес сопоставление результатов проведенной реконструкции поля напряжений территории Узбекистана на основе механизмов очагов слабых и умеренных землетрясений ($M \leq 4.5$) с аналогичными построениями, проведенными по сильным ($M \geq 5.0$) землетрясениям. Визуализация реконструкции поля напряжений по сильным землетрясениям (рис. 13, 14, 15) проведена на базе

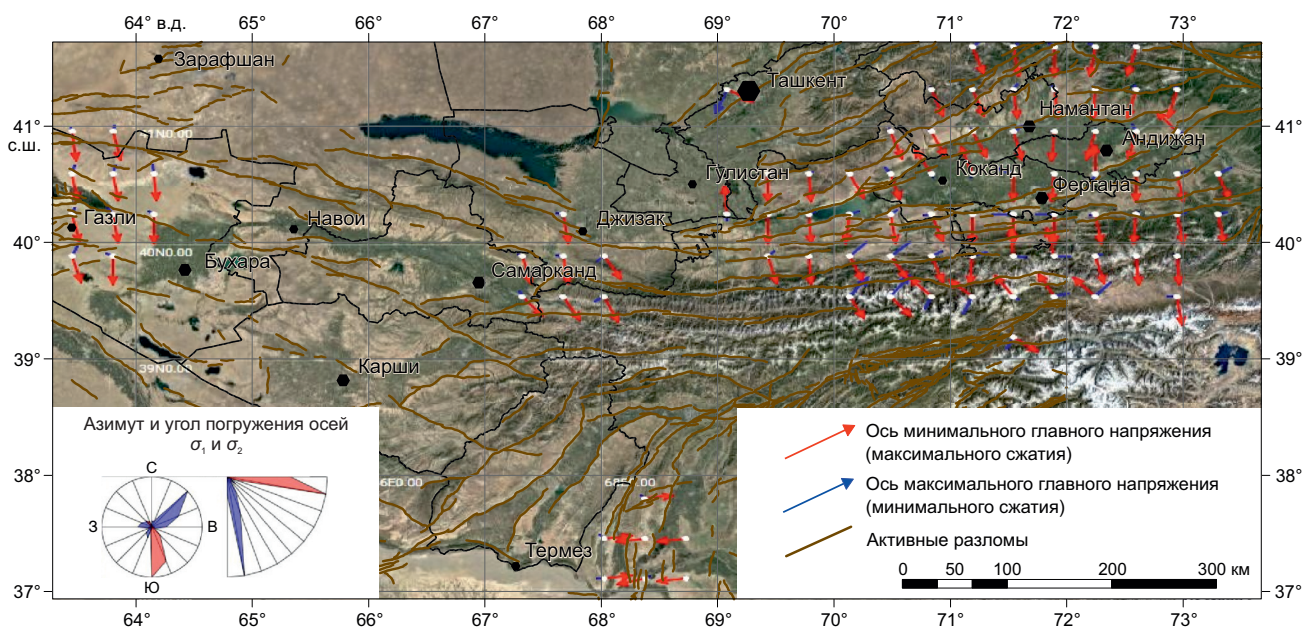


Рис. 13. Проекция на горизонтальную плоскость осей главных напряжений σ_1 и σ_3 .
 Fig. 13. Projections to the horizontal plane of the principal stress axes σ_1 and σ_3 .

интернет-платформы «Тектонические напряжения Евразии» [Akhmedov et al., 2015].

При общей схожести роза-диаграмм азимутов и углов погружения осей главных напряжений σ_3 и σ_1 для всего исследуемого региона по ряду областей отмечаются некоторые различия. Для Газлийской очаговой зоны в результате реконструкции напряжений по сильным землетрясениям азимут оси σ_3 меняется с юго-восточного (полученного по слабым и умеренным землетрясениям) на южный при примерно том

же угле погружения, а погружение оси σ_1 при рассмотрении только сильных землетрясений становится практически близвертикальным. То же самое можно сказать относительно угла погружения оси σ_1 для участка, относящегося к Нуратинскому и Зирабулак-Зиаэтдинскому хребтам, между городами Джизак и Самарканд. Для Приташкентского района и для Ферганской межгорной впадины можно отметить соответствие азимутов простирания и углов погружения осей σ_3 и σ_1 .

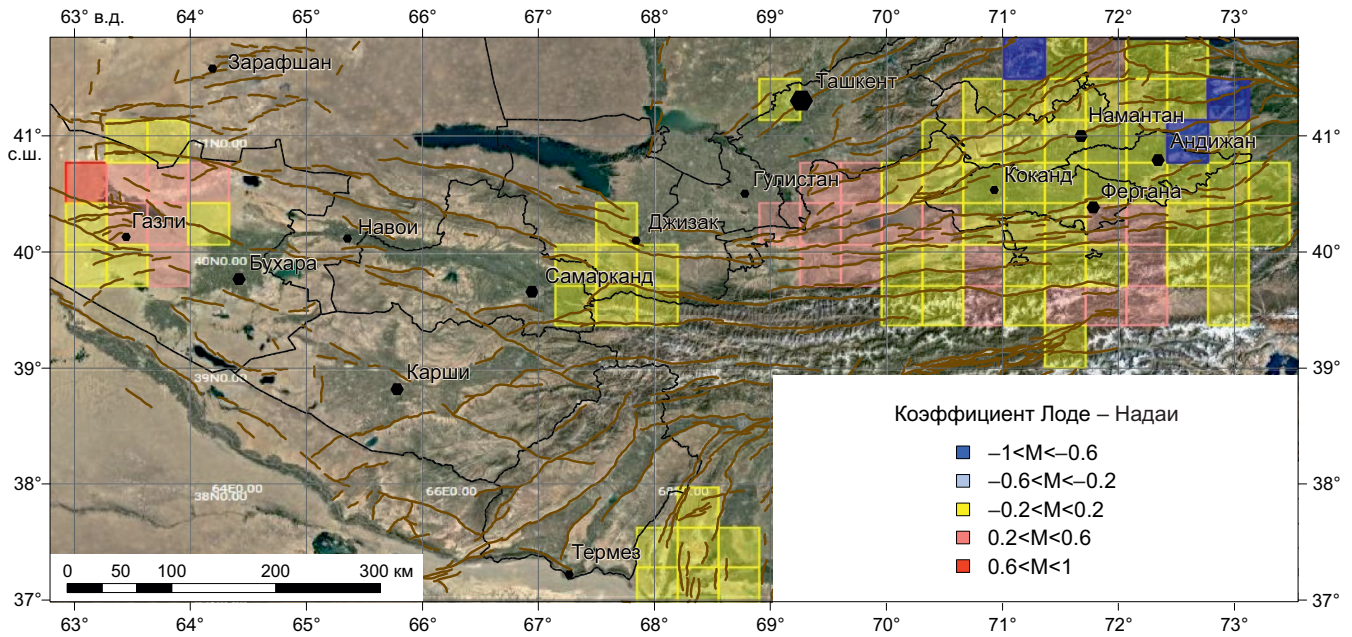


Рис. 14. Площадное распределение коэффициента Лодэ – Надаи.

Fig. 14. Spatial distribution of the Lode – Nadai coefficient.

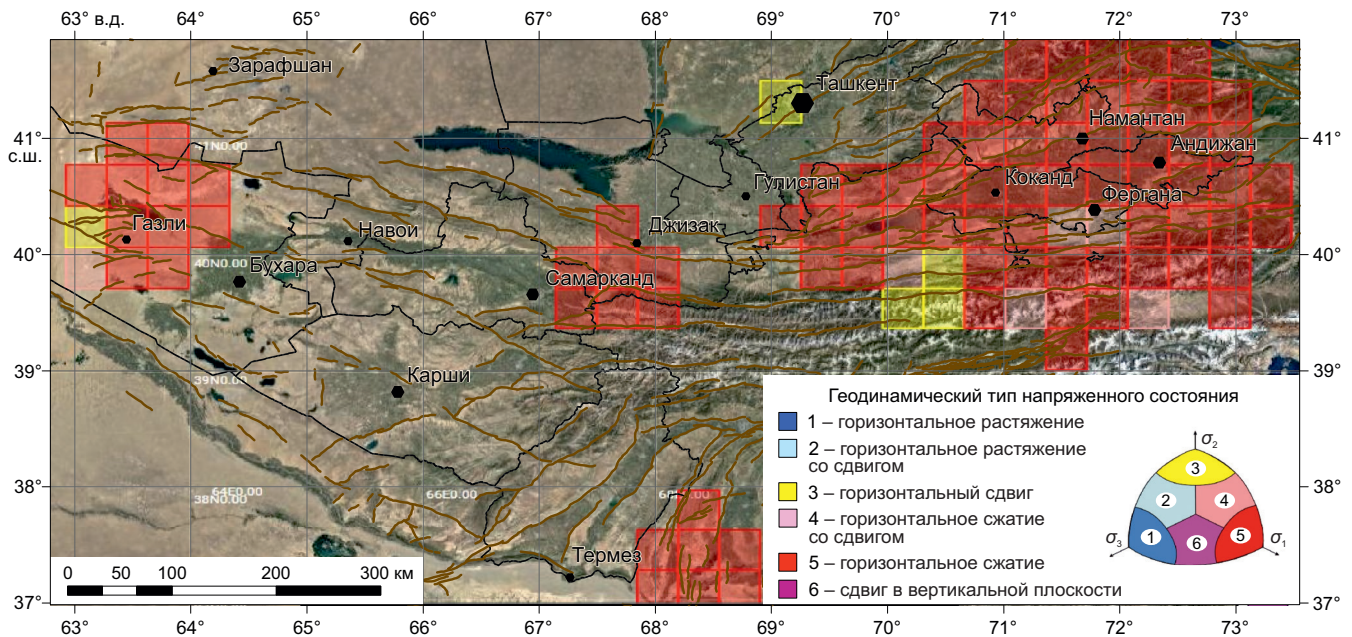


Рис. 15. Районирование территории по геодинамическим типам напряженного состояния.

Fig. 15. Zoning of the territory of Uzbekistan by geodynamic types of stress state.

Сопоставляя карты площадного распределения коэффициента Лодэ – Надаи (см. рис. 10, а; рис. 14) и типов геодинамического режима (см. рис. 11, а; рис. 15), полученные в результате проведенной реконструкции по механизмам землетрясений с $M \leq 4.5$ из сводного каталога, в котором для основной доли слабых сейсмических событий решения получены путем массового определения механизмов, а потому вероятность попадания отдельных событий с неверным решением достаточно велика, с результатами реконструкции по механизмам землетрясений с $M \geq 5.0$, для которых проводятся индивидуальные авторские построения, точность решений которых можно проконтролировать сопоставлением с решениями авторитетных сейсмологических организаций (СМТ и др.), можно отметить их вполне удовлетворительное соответствие. С одной стороны, это свидетельствует о достаточной кондиционности сборного каталога, с другой – о высокой устойчивости алгоритма МКА разрывных смещений, которая достигается формированием однородных выборок механизмов землетрясений в каждой ячейке осреднения. Это вселяет надежду на то, что полученная для ряда областей Узбекистана детализированная картина результатов реконструкции по сводному каталогу МОЗ достаточно адекватно отражает реальное напряженное состояние массивов горных пород.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенного исследования сводятся к следующему.

Выполнен анализ сборного каталога механизмов очагов землетрясений территории Узбекистана, составленного из решений, полученных разными авторами. Установлено, что на территории Узбекистана встречаются все кинематические типы разрывов в очагах, но преобладающими являются взбросы и взбросо-сдвиги. Для всей исследуемой территории преобладает близмеридиональное направление оси сжатия P и близширотное оси растяжения T . Азимут оси растяжения имеет больший разброс, чем оси сжатия. Для большинства сейсмических событий ось сжатия близгоризонтальна, а ось растяжения близвертикальна. Распределение этих же параметров для отдельных районов показывает их существенную площадную вариабельность.

Методом катакластического анализа разрывных смещений проведено два этапа реконструкции поля напряжений, в результате которых для ряда сейсмоактивных областей территории Узбекистана получена сплошная картина корового напряженного состояния.

Анализ пространственного положения осей главных напряжений показал, что угол погружения оси минимального сжатия σ_1 существенно меняется с глубиной. На малых глубинах (0–10 км) отмечается большой разброс (от 0 до 80°) в углах погружения оси σ_1 . На глубинах более 10 км для большинства доменов ось σ_1 субвертикальна. Наибольшие вариации азимута оси минимального сжатия с увеличением глубины отмечаются в районе Алайского хребта (от субширотного на

малых глубинах до субмеридионального на больших) и в восточной части Газлийской очаговой зоны (от северо-восточного до строго меридионального).

Угол погружения оси главного сжатия σ_3 ведет себя более стабильно при изменении глубины сейсмоактивного слоя. Как для сейсмоактивного слоя в целом, так и для различных глубин для большинства доменов ось σ_3 близгоризонтальна. В большинстве случаев простираение оси максимального сжатия практически перпендикулярно направлению структур. Эта особенность нарушается для юго-восточной части Таласо-Ферганского разлома, где направления оси σ_3 и разлома практически совпадают.

Анализ распределения коэффициента Лодэ – Надаи, рассчитанного для сейсмоактивного слоя в целом, показал, что преобладающим для исследуемой территории является напряженное состояние, близкое к чистому сдвигу ($-0.2 < \mu_o < 0.2$). Эта же особенность отмечается и для верхнего (0–10 км) сейсмоактивного слоя. Большая часть доменов с напряженным состоянием, смещенным к одноосному растяжению, располагается в пределах Ферганской межгорной впадины. Области значений параметра μ , смещенные к напряженному состоянию одноосного сжатия, расположены на отдельных сегментах Южно-Ферганского и Северо-Ферганского разломов и одноименных флексурно-разрывных зон, а также в очаговой зоне Газли.

Без дифференциации сейсмоактивного слоя по глубинам практически вся исследуемая территория характеризуется режимом горизонтального сжатия. Домены, находящиеся в режиме горизонтального сдвига, расположены в центральной и юго-восточной части Таласо-Ферганского разлома.

Для верхнего сейсмоактивного слоя (0–10 км) выделяются значительные по размерам области, характеризующиеся режимом горизонтального растяжения и горизонтального сдвига. Первые расположены за Алайским хребтом в пределах одноименной долины. В этих областях ось минимального сжатия σ_1 близгоризонтальна и ориентирована в направлении простираения Южно-Тянь-Шаньской сейсмоактивной зоны, а ось максимального сжатия σ_3 имеет направление вкрест структур и близвертикальна. Области с режимом горизонтального сдвига расположены в северной части Бабатаг-Кейкитауской структуры, в северо-восточной части сейсмоактивных структур Приташкентского района и на отдельных сегментах Южно-Ферганской сейсмоактивной зоны.

По всей исследуемой территории с увеличением глубины доля доменов, характеризующихся режимом горизонтального сжатия, по отношению ко всей области, где проведена реконструкция, возрастает.

Таким образом, можно заключить, что исследуемая территория при районировании по типам напряженного состояния имеет блоковое строение. В пределах некоторых блоков наблюдается стабильная ориентация осей главных напряжений, а в других даже ориентация осей сжатия, имеющих устойчивое субгоризонтальное

положение, может изменяться по простиранию (кора горного окружения Ферганской долины).

Результаты изучения напряженного состояния территории Узбекистана, начатого в статье [Rebetsky et al., 2020] и продолженного в данной работе, закладывают основу для применения тектонофизических методов районирования разломов земной коры исследуемой территории по степени потенциальной опасности [Rebetsky, Kuzikov, 2016], что следует рассматривать в качестве перспективной задачи.

6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Abdukadyrov A.A., Belenovich T.Ya., Vlasova A.A., Lukk A.A., Leonova V.G., Lopatina T.A., Matasova L.M., Muraliev A.M. et al., 1980. Earthquake Focal Mechanism in Central Asia and Kazakhstan. In: Earthquakes in the USSR in 1980. Nauka, Moscow, p. 112–117 (in Russian) [Абдукадыров А.А., Беленович Т.Я., Власова А.А., Лукк А.А., Леонова В.Г., Лопатина Т.А., Матасова Л.М., Муралиев А.М. и др. Механизм очагов землетрясений Средней Азии и Казахстана // Землетрясения в СССР в 1980 году. Москва: Наука, 1980. С. 112–117].

Akhmedov M.B., Shlyunkin A.V., Luk'yanov I.V., Rebetsky Yu.L., 2015. Modern Crustal Stress Field on the Site of the IPE RAS "Global Stress Map". In: Modern Tectonophysics. Methods and Results. Materials of the Fourth Youth Tectonophysical School-Seminar (October 5–9, 2015). Vol. 1. IPE RAS Publishing House, Moscow, p. 16–21 (in Russian) [Ахмедов М.Б., Шлюнкин А.В., Лукьянов И.В., Ребетский Ю.Л. Поле современных напряжений земной коры на сайте ИФЗ РАН «Global Stress Map» // Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы Четвертой молодежной тектонофизической школы-семинара (5–9 октября 2015 г.). М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2015. Т. 1. С. 16–21].

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., 2017. Synoptic Long-Term Forecast of Expecting Seismic Activity Places in Uzbekistan. *Georisk* 2, 20–28 (in Russian) [Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А. Синоптический долгосрочный прогноз мест ожидаемой сейсмической активизации на территории Узбекистана // *Геориск*. 2017. № 2. С. 20–28].

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., 2018. Identification of Expected Seismic Activity Areas by Forecasting Complex Seismic-Mode Parameters in Uzbekistan. *Geodesy and Geodynamics* 9 (2), 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.11.005>.

Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., 2020. Complex of General Seismic Zoning Maps OSR-2017 of Uzbekistan. *Geodesy and Geodynamics* 11 (4), 273–292. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.03.004>.

Atabekov I.U., 2020. Earth Core's Stresses Variation in Central Asian Earthquakes Region. *Geodesy and Geodynamics* 11 (4), 293–299. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2019.12.005>.

Vachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G., 2017. The Active Faults of Eurasia Database. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 711–736 (in Russian) [Бачманов Д.М.,

Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>.

Bezrodny E.M., Tuychiev Kh.A., 1987. Focal Mechanisms of Strong Earthquakes in Uzbekistan. Fan, Tashkent, 143 p. (in Russian) [Безродный Е.М., Туйчиев Х.А. Механизмы очагов сильных землетрясений Узбекистана. Ташкент: Фан, 1987. 143 с.].

Eksrom G., Nettles M., 2014. Global CMT. Available from: <http://www.globalcmt.org/> (Last Accessed 17.04.2014).

Ibragimov R.N., Nurmatov U.O., Ibragimov O.R., 2002. Seismotectonic Method for Assessing Seismic Hazard and Issues of Seismic Zoning. In: *Seismic Zoning and Earthquake Forecasting in Uzbekistan*. Hydroingeo, Tashkent, p. 59–74 (in Russian) [Ибрагимов Р.Н., Нурматов У.О., Ибрагимов О.Р. Сейсмотектонический метод оценки сейсмической опасности и вопросы сейсмического районирования // Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане. Ташкент: Гидроингео, 2002. С. 59–74].

Kuchai O.A., Bushenkova N.A., 2009. Focal Mechanisms of Earthquakes in Central Asia. *Physical Mesomechanics* 12 (1), 17–24 (in Russian) [Кучай О.А., Бушенкова Н.А. Механизмы очагов землетрясений Центральной Азии // *Физическая мезомеханика*. 2009. Т. 12. № 1. С. 17–24].

Kuznetsova K.I., Bagmanova N.Kh., Matasova L.M., Mikhailova R.S., Muraliev A.M., Seiduzova S.S., Soboleva O.V., 1995. A Set of Seismological Parameters and Modern Tectonic Movements in the Alpine Fold Belt. Part 1. Physics of the Earth 10, 26–40 (in Russian) [Кузнецова К.И., Багманова Н.Х., Матасова Л.М., Михайлова Р.С., Муралиев А.М., Сейдузова С.С., Соболева О.В. Совокупность сейсмологических параметров и современные тектонические движения в Альпийском складчатом поясе. Ч. 1 // *Физика Земли*. 1995. № 10. С. 26–40].

Lukk A.A., Yunga S.L., Maisuradze V.V., Zinnatullina A.M., Leonova V.G., Adamova L.G., Vlasova A.A., Matasova L.M. et al., 1988. Earthquake Focal Mechanism and Seismotectonic Deformation of Central Asia and Kazakhstan. In: *Earthquakes in the USSR in 1985*. Nauka, Moscow, p. 192–198 (in Russian) [Лукк А.А., Юнга С.Л., Майсурадзе В.В., Зиннатуллина А.М., Леонова В.Г., Адамова Л.Г., Власова А.А., Матасова Л.М. и др. Механизм очагов землетрясений и сейсмотектоническая деформация Средней Азии и Казахстана // *Землетрясения в СССР в 1985 году*. М.: Наука, 1988. С. 192–198].

Morris A.P., Ferrill D.A., Henderson D.B., 1996. Slip Tendency Analysis and Fault Reactivation. *Geology* 24 (3), 275–278. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<0275:STAAFR>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0275:STAAFR>2.3.CO;2).

Mukambaev A.S., Mikhailova N.N., 2014. Solution of the Problem of Inhomogeneity of Magnitudes in Seismic Sounding Studies of the Republic of Kazakhstan Territory. *Bulletin of NNC RK* 4, 86–92 (in Russian) [Мукамбаев А.С., Михайлова Н.Н. Решение проблемы неоднородности магнитуд в работах по сейсмическому зондированию территории Республики Казахстан // *Вестник НЯЦ РК*. 2014. Вып. 4. С. 86–92].

Rautian T.G., 1960. Energy of Earthquakes. In: Methods of Detailed Study of Seismicity. Publishing House of the USSR Academy of Science, Moscow, 176, p. 75–114 (in Russian) [Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. М.: Изд-во АН СССР, 1960. № 176. С. 75–114].

Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G., Kendall A.D., 2007. Origins and Methodology of the Russian Energy K-Class System and Its Relationship to Magnitude Scales. *Seismological Research Letters* 78 (6), 579–590. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.6.579>.

Rebetsky Yu.L., 2003. Stress–Strain State and Mechanical Properties of Natural Massifs from Earthquake Focal Mechanisms and Structural–Kinematic Characteristics of Fractures. PhD Thesis (Dr. Sc. Phys.-Math.). Moscow, 455 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристикам трещин: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. М., 2003. 455 с.].

Rebetsky Yu.L., 2007. Stress State Corresponding to Large-Scale Brittle Fracturing of Rocks. *Doklady Earth Sciences* 416 (5), 680–685 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Напряженное состояние, отвечающее формированию крупномасштабного хрупкого разрушения горных пород // Доклады АН. 2007. Т. 416. № 5. С. 680–685].

Rebetsky Yu.L., 2020. The Current State of Crustal Stresses in the Caucasus According to the Unified Catalogue of Earthquake Mechanisms. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (1), 17–29. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-1-0459>.

Rebetsky Yu.L., Ibragimova T.L., Ibragimov R.S., Mirzaev M.A., 2020. Stress State of Uzbekistan's Seismoactive Areas. *Problems of Engineering Seismology* 47 (3), 28–52 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Ибрагимова Т.Л., Ибрагимов Р.С., Мирзаев М.А. Напряженное состояние сейсмоактивных областей Узбекистана // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 3. С. 28–52]. <https://doi.org/10.21455/VIS2020.3-2>.

Rebetsky Yu.L., Kuzikov S.I., 2016. Active Faults of the Northern Tien Shan: Tectonophysical Zoning of Seismic Risk. *Russian Geology and Geophysics* 57 (6), 967–983. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.05.004>.

Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Kuchay O.A., Tatevossian R.E., 2012. Development of Inversion Methods on Fault Slip Data. Stress State in Orogenes of the Central Asia. *Tectonophysics* 581, 114–131. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.09.027>.

Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Kuzikov S.I., Kostyuk A.N., 2010. Tectonic Stresses, Seismotectonic and General Tectonic Deformations of the Crust in the Central Tien Shan. In: Problems of Seismology in Uzbekistan. Proceedings of the International Conference on Modern Problems of Seismology, Hydrogeology and Engineering Geology. Vol. 1. Publishing House of the National University of Uzbekistan, Tashkent, p. 268–274 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Кузиков С.И., Костюк А.Н. Тектонические напряжения, сеймотектонические и общие тектонические деформации земной коры Центрального Тянь-Шаня //

Проблемы сейсмологии в Узбекистане: Материалы Международной конференции «Современные проблемы сейсмологии, гидрогеологии и инженерной геологии». Ташкент: Изд-во НУУз, 2010. Т. 1. С. 268–274].

Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A., Sychev V.N., Kuzikov S.I., Marinin A.V., 2016. The Stress State of the Northern Tien Shan Crust Based on the Knet Seismic Network Data. *Russian Geology and Geophysics* 57 (3), 496–520 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А., Сычев В.Н., Кузиков С.И., Маринин А.В. Напряженное состояние коры Северного Тянь-Шаня по данным сейсмической сети KNET // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 3. С. 496–520]. <https://doi.org/10.15372/GiG20160303>.

Rebetsky Yu.L., Tatevossian R.E., 2013. Rupture Propagation in Strong Earthquake Sources and Tectonic Stress Field. *Bulletin de la Societe Geologique de France* 184 (4–5), 335–346. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.184.4-5.335>.

Riznichenko Yu.V., 1985. Problems of Seismology. Nauka, Moscow, 408 p. (in Russian) [Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.].

Sadykova A.B., 2012. Seismic Hazard of the Territory of Kazakhstan. High Technology, Almaty, 267 p. (in Russian) [Садыкова А.Б. Сейсмическая опасность территории Казахстана. Алматы: Хай Технолоджи. 2012. 267 с.].

Seiduzova S.S., Matasova L.M., 1985. Study of Correlations between Seismic Flow Parameters and Features of Energy Regime of the Earth's Crust in Relation to Quantitative Estimates of Seismic Hazard for 1984–1985. Final Report. In: Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics of the Academy of Sciences of the Uzbek SSR. Tashkent, 187 p. (in Russian) [Сейдузова С.С., Матасова Л.М. Изучение корреляционных связей параметров сейсмического течения с особенностями энергетического режима земной коры применительно к количественным оценкам сейсмической опасности за 1984–1985 гг.: Заключительный отчет / Труды Института геологии и геофизики АН УзССР. Ташкент, 1985. 187 с.].

Turapov M.K., Yarmukhamedov A.R., Umurzakov R.A., Irushkin S.A., Ibragimov R.S., 2000. Seimogeodynamics of the Karzhantau Fault. University, Tashkent, 236 p. (in Russian) [Турапов М.К., Ярмухамедов А.Р., Умурзаков Р.А., Ирушкин С.А., Ибрагимов Р.С. Сеймогеодинамика Каржантауского разлома. Ташкент: Университет, 2000. 236 с.].

Ulomov V.I., 1974. Dynamics of the Earth's Crust in Central Asia and Earthquake Forecasting. Fan, Tashkent, 216 p. (in Russian) [Уломов В.И. Динамика земной коры Средней Азии и прогноз землетрясений. Ташкент: Фан, 1974. 216 с.].

Umurzakov R.A., 2010. Structural and Seismic Indications of the Elements of Recent and Present-Day Stress Fields in Several Epicentral Regions of Western Tien Shan. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth* 46 (5), 379–386. <https://doi.org/10.1134/S1069351310050022>.

Yunga S.L., 1990. Methods and Results of Seismotectonic Deformation Studies. Nauka, Moscow, 191 p. (in Russian) [Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сеймотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.].