

УДК 550.34.06

Аристова И.Л.¹, Досайбекова С.К.², Бектурганова Б.Т.³¹Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан²ТОО Сейсмологическая опытно-методическая экспедиция МЧС РК., Алматы, Казахстан³ТОО Институт сейсмологии МЧС РК, Алматы, Казахстан

МОНИТОРИНГ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ В РАЙОНЕ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ ПО ДАННЫМ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Аннотация. Целью данной работы было на основании реконструкции параметров напряжений методом катакластического анализа разрывных смещений по данным механизмов очагов землетрясений провести анализ распределения по площади фоновых значений параметров напряжённо-деформированного состояния (НДС) за период сейсмического затишья (1991 - 2021), сформировавшегося в районе после реализации сильнейшего Байсорунского землетрясения, так и по результатам мониторинга 2021 г. Результаты мониторинга сопоставить с напряжённым состоянием, предшествовавшим реализации Байсорунского землетрясения и дать оценку условий напряжённого состояния глубинных слоев земной коры в связи с сейсмической опасностью. Были проведены исследования по данным мониторинга сейсмотектонических условий в регионе Северного Тянь-Шаня, который характеризуется, с одной стороны высокой плотностью населения и промышленных объектов, с другой стороны, достаточно высокой сейсмической активностью земной коры, нацеленные на своевременное выявление ситуации, опасной реализацией сильного землетрясения.

Ключевые слова: сейсмотектоническая деформация, механизм очагов землетрясений, напряжённое состояние, тензор.

ЖЕР ТИТИРӨӨНҮН ФОКУСТУК МЕХАНИЗМДЕРИНИН МААЛЫМАТТАРЫ БОЮНЧА ТҮНДҮК ТЯНЬ-ШАНЬ ОБЛАСТЫНДА ЖЕР КЫРТЫШЫНЫН СТРЕСС-ДЕФОРМАЦИЯЛЫК АБАЛЫНА БАЙКОО ЖҮРГҮЗҮҮ

Кыскача мазмуну. Бул иштин максаты жер титирөөнүн очокторунун механизмдерине ылайык жаракалардагы жылышууларды катакласттык анализдөө методу менен чыңалуу параметрлерин реконструкциялоого негизделип, параметрлердин фондук маанилеринин аянты боюнча бөлүштүрүлүшүн талдоо болгон. Байсорун аймагындагы эң күчтүү жер титирөөдөн кийин пайда болгон сейсмикалык тыныгуу мезгилиндеги (1991-2021-жж.) чыңалуу-деформациялык абал (ССС) жана 2021-жылдагы мониторингдин жыйынтыгы боюнча. Мониторингдин натыйжалары Байсорун жер титирөөсүнө чейинки стресс абалын жана сейсмикалык коркунучка байланыштуу жер кыртышынын терең катмарларынын стресс абалынын шарттарын баалоо. Түндүк Тянь-Шань аймагындагы сейсмотектоникалык шарттардын мониторингинин маалыматтары боюнча изилдөөлөр жүргүзүлдү, ал бир жагынан калктын жана өндүрүш объектеринин жогорку жыштыгы менен, экинчи жагынан, сейсмикалык активдүүлүктүн жетишээрлик жогору болушу менен мүнөздөлөт жана катуу жер титирөөдөн улам коркунучтуу кырдаалды өз убагында аныктоого багытталган.

Негизги сөздөр: сейсмотектоникалык деформация, жер титирөөнүн очокторунун механизми, чыңалуу абалы, тензор.

MONITORING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE EARTH'S CRUST IN THE NORTHERN TIEN SHAN REGION ACCORDING TO DATA OF EARTHQUAKE'S FOCAL MECHANISMS

Abstract. The purpose of the work is, basing on the reconstruction of stress parameters using a method of cataclastic analysis of rupture shifts, to analyze the distribution of background values of the strain-stress state parameters for the period of seismic calm (1991 - 2021), formed at the region after the largest Baysoryun earthquake, and by using the results of seismic monitoring for 2021.

The monitoring results are to be compared with the stress state that preceded the Baysoryun earthquake and assess the conditions of the stress state of deep crust layers in purpose of seismic hazard assesment. The investigations were conducted using monitoring data of seismic and tectonic conditions at Northern Tien Shan region characterized by high density of population and numerous industrial facilities, and by high seismic activity of the earth crust. The investigations are aimed at timely determination of conditions preceding a large earthquake.

Keywords: seismic and tectonic deformation, earthquake focal mechanism, stress state, tensor.

Введение

В целом на территории Тянь-Шаня по данным многолетних наблюдений превалирует взбросовый тип механизмов, что свидетельствует о преобладании здесь горизонтального сжатия земной коры, характерного для всего региона Средней Азии. Вместе с тем установлено, что напряжённно-деформированное состояние исследуемого района Северного Тянь-Шаня очень неустойчиво во времени и пространстве. Обнаружены временные интервалы, когда на территории всех хребтов Северного Тянь-Шаня преобладали условия горизонтального растяжения [1].

Исследование пространственно-временных вариаций параметров на фоне среднего поля сейсмотектонических напряжений способствует изучению и прогнозированию сейсмотектонического процесса, поскольку напряжения в земной коре прямо связаны с процессом разрушения и позволяют наиболее полно характеризовать стадию деформационного процесса. В результате реконструкции параметров напряжений методом катакластического анализа разрывных смещений на основе механизмов очагов землетрясений, были выявлены особенности напряжённно-деформированного состояния в 1989-1990 гг., предшествующие реализации наиболее сильного в регионе Байсорунского землетрясения с $M=6.3$ [2]. Установленные особенности вполне соответствуют ожидаемым условиям в связи с подготовкой сильного землетрясения в рамках метода катакластического анализа.

Целью данной работы было на основании реконструкции параметров напряжений методом катакластического анализа разрывных смещений по данным механизмов очагов землетрясений провести анализ распределения по площади фоновых значений параметров напряжённно-деформированного состояния (НДС) за период сейсмического затишья (1991 - 2021), сформировавшегося в районе после реализации сильнейшего Байсорунского землетрясения, так и по результатам мониторинга 2021 г. Результаты мониторинга сопоставить с напряжённным состоянием, предшествовавшим реализации Байсорунского землетрясения и дать оценку условий напряжённного состояния глубинных слоёв земной коры в связи с сейсмической опасностью.

Характеристика района исследования, используемые материалы и методика исследований

Исследования напряжённного состояния проведены для территории Северного Тянь-Шаня, ограниченной координатами 42° - 44° с.ш., 76° - 79° в.д. Эта территория

включает хребты Заилийский-Кунгей Алатау, Терской Алатау, Иссык-Кульскую и Илийскую впадины. Вся территория, в целом, находится в условиях субмеридионального сжатия, характерного для всей Центральной Азии, в которых сформировалась существующая на рассматриваемой территории сеть разломов [3]. Система разломов представлена трансрегиональными сдвигами северо-западного простирания и взбросами, взбросо-надвигами субширотного простирания. С главными разломами региона связаны одноимённые сейсмогенерирующие зоны, сейсмогенный потенциал которых, согласно карте общего сейсмического зонирования (ОСЗ) [4], изменяется от 5 до 8 и более, где возможны сотрясения с интенсивностью до 9-10 баллов по шкале MSK-64 (рисунок 1). К главным сейсмогенерирующим зонам приурочена пространственная структура сейсмичности региона. Общей закономерностью в распределении произошедших наиболее сильных землетрясений Северного-Тянь-Шаня, в том числе и катастрофических, являлось формирование их очагов в зонах северо-восточного простирания. В настоящее время в течение трёх последних десятилетий наблюдается период затишья, выражающийся в отсутствии сильных землетрясений магнитудой 6 и более [5].

Реконструкция напряжений выполнена методом катакластического анализа с использованием программы Ю.Л. Ребецкого «*STRESSseism*» [6] на основе регионального каталога механизмов очагов землетрясений. Механизмы очагов определялись в рамках модели двойного диполя по первым вступлениям продольных и поперечных волн с использованием записей землетрясений, полученных на станциях сейсмических сетей Казахстана и Кыргызстана. Результаты реконструкции напряжений получены по данным механизмов очагов событий в энергетическом диапазоне $2.5 < m_b \leq 4.0$ в узлах сетки $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ для глубины 10 км для периода 1991-2021 гг. и 2021 г. Данные за 1991 - 2021 гг. характеризуют фоновую обстановку, сформировавшуюся в районе после реализации Байсорунского землетрясения. Данные, полученные за 2021 г. позволяют выявить отклонения современной обстановки НДС от фоновых характеристик и дать оценку сложившейся ситуации в связи с сейсмической опасностью.

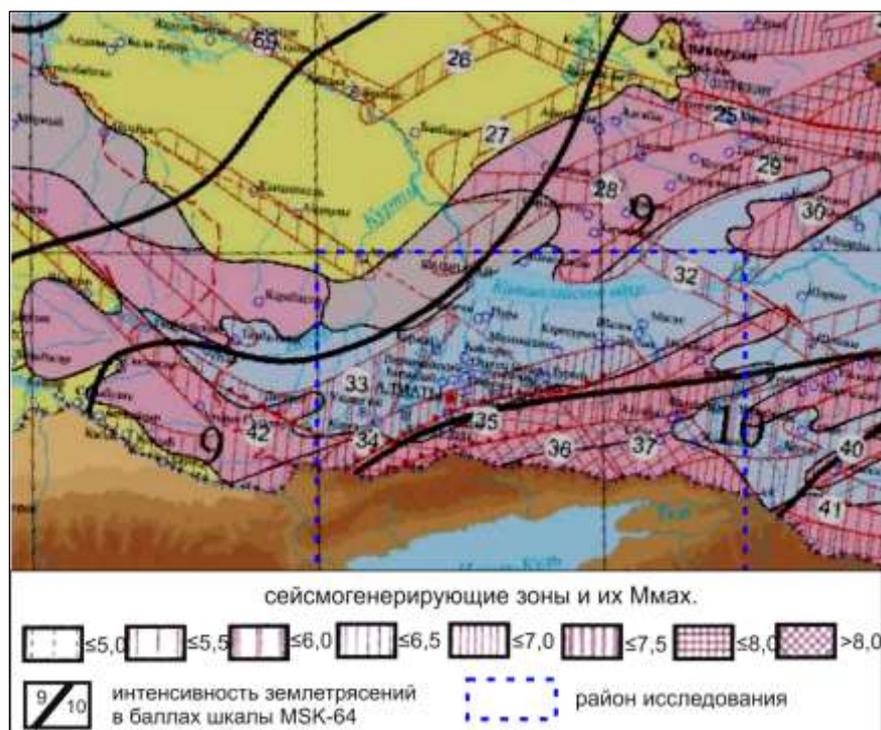


Рисунок 1. Район исследования на фрагменте карты общего сейсмического зонирования.

Результаты исследования

Ориентация осей главных напряжений

Важнейшим элементом для реконструкции НДС является ориентация осей главных напряжений. Для оси сжатия в регионе в целом преобладающим является близгоризонтальное и субмеридиональное с небольшим отклонением на запад либо восток направление, для оси растяжения – близвертикальное. Анализ пространственного распределения главных осей напряжений рассматриваемых временных периодов свидетельствует, что по фоновым значениям в целом их ориентация на большей части территории характеризуется близгоризонтальными ($< 30^\circ$) углами погружения осей напряжения сжатия (рисунок 2 (а)) и близвертикальными ($> 60^\circ$) – осей растяжения (рисунок 2 (б)). Преобладающее направление близгоризонтальных осей сжатия субмеридиональное. Небольшие по размеру зоны с аномальными для региона близвертикальными углами погружения осей сжатия и близгоризонтальными – осей растяжения отмечены на юго-востоке в хр. Терской Алатау южнее Баянкольского разлома и в Заилийской впадине между Дегересским и Капчагай-Чиликским разломами.

Распределение по площади значений углов погружения осей сжатия и растяжения в 2021 г. (рисунок 3) отличается от фоновых характеристик превалированием на значительной территории, соответственно, близвертикальных ($> 60^\circ$) и близгоризонтальных ($< 30^\circ$) значений. Это зона в центральной части хр. Кунгей-Заилийского Алатау к западу от Талгарского разлома, захватывающая на севере в районе Алматы область Илийской впадины, а на юго-западе и юго-востоке области Исык-Кульской впадины. Ещё одна зона аномальных значений углов погружения осей напряжений сформировалась на западе между Чилик-Кеминским и Северо-Кунгейским разломами.

Такой системой действующих напряжений обусловлено образование в 2021 г. областей, характеризующихся сбросовым геодинамическим типом, тогда как по фоновым значениям на всей территории превалирует взбросовый тип деформирования, характерный для Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона [5].

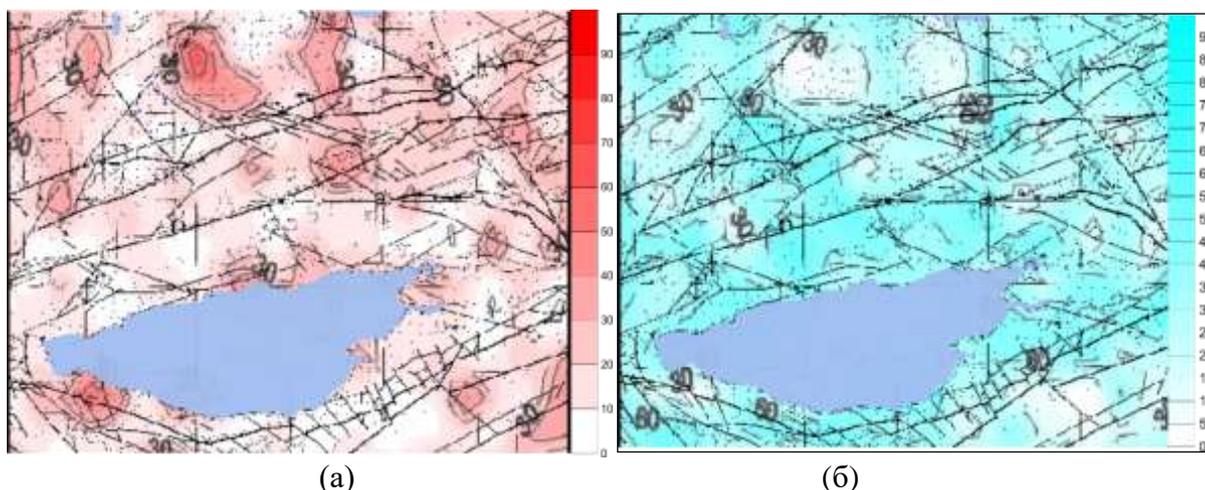


Рисунок 2. Распределение по площади значений углов погружения осей напряжений сжатия (а) и растяжения (б) за период 1991-2021 гг.

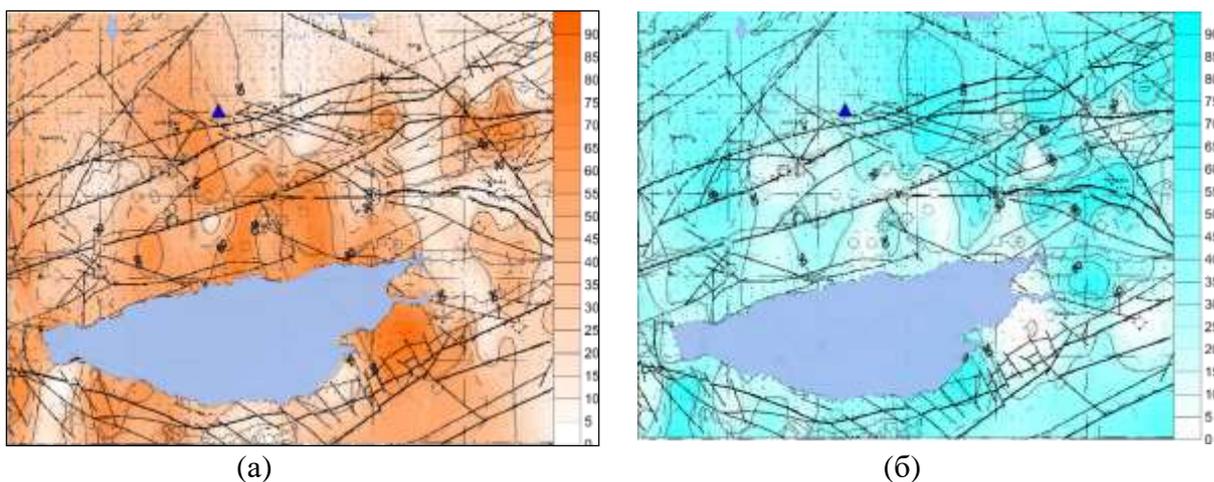


Рисунок 3. Распределение по площади значений углов погружения осей напряжений сжатия (а) и растяжения (б) за 2021 г.

Тип тензора напряжений

Тип тензора характеризует коэффициент Лодэ-Надаи, определяющий соотношение величин главных осей тензора, изменяющийся от +1 (одноосное сжатие) до -1 (одноосное растяжение). На рассматриваемой территории как по фоновым значениям, так и в 2021 г. тип тензора напряжений характеризуется преимущественно сдвигом, либо переходным режимом от сдвига к одноосному сжатию, значения коэффициента Лодэ-Надаи в интервале от -0.2 до $+0.2$ и от $+0.2$ до $+0.4$, соответственно (рисунок 4 (а)). Значения коэффициента Лодэ-Надаи в интервале от $+0.4$ до $+0.8$ (одноосное сжатие) по фоновым характеристикам концентрируются в переходных зонах от Заилийского Алатау к Илийской впадине.

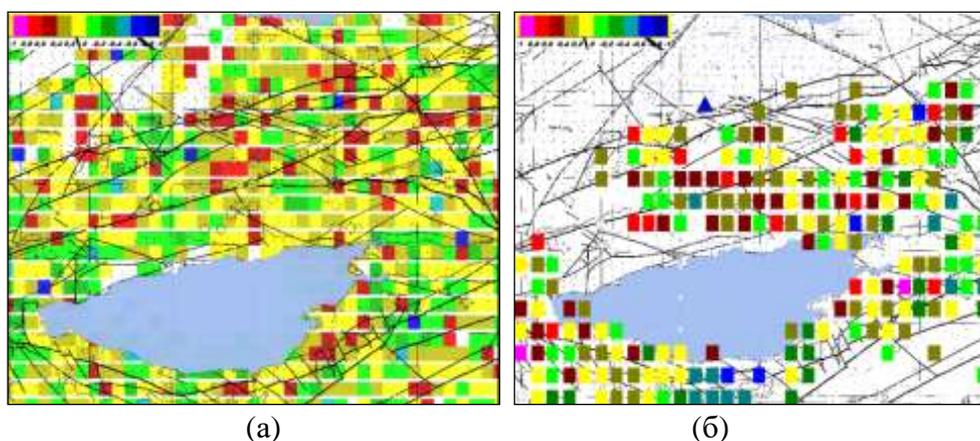


Рисунок 4. Тип тензора напряжений (значения коэффициента Лодэ-Надаи в узле расчёта) за 1991-2021 гг. (а) и за 2021 г. (б).

Анализ распределения коэффициента Лодэ-Надаи по данным 2021 г. свидетельствует о неоднородности соотношения величин главных напряжений в земной коре исследуемой территории. При превалировании участков, характеризующихся состоянием, близким к чистому сдвигу, в хребтах Кунгей-Заилийского Алатау увеличивается доля зон, характеризующихся напряженным состоянием, смещённым в сторону одноосного сжатия. На юге Иссы-Куля сформировалась зона одноосного растяжения (рисунок 4 (б)).

Относительные величины эффективного давления и касательных напряжений

Важным результатом реконструкции напряжений является определение относительных величин максимальных касательных напряжений и эффективного всестороннего давления (разность между давлением в горных породах и флюидным давлением трещинно-порового пространства). В рамках МКА предполагается, что в областях, характеризующихся сейсмической активностью, массивы горных пород находятся в напряжённом состоянии, близком к предельному. Из соотношений Кулона – Мора это определяет прямо пропорциональную связь между эффективными нормальными и касательными напряжениями на плоскости хрупкого разрыва [6]. Как следствие, конфигурация распределения по площади значений эффективного давления, касательных напряжений подобна, в связи с чем, для демонстрации, приводится распределение только касательных напряжений (рисунок 5).

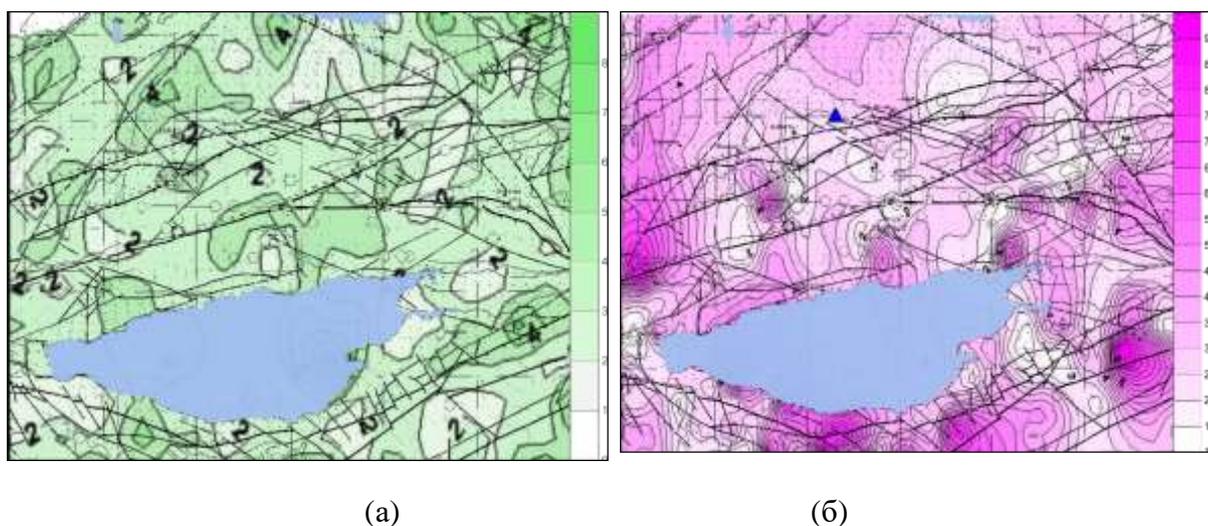


Рисунок 5. Распределение по площади относительной величины касательных напряжений за 1991-2021 гг. (а) и за 2021 г. (б).

Поскольку для хрупкого разрушения (разрыва в очаге землетрясения) важен не столько высокий уровень максимальных касательных напряжений (τ - инициирует разрушение), сколько то, как они соотносятся с эффективным давлением (P_{ef}), которое создает силы трения, препятствующие разрушению [6], рассмотрено распределение параметра τ/P_{ef} (рисунок 6).

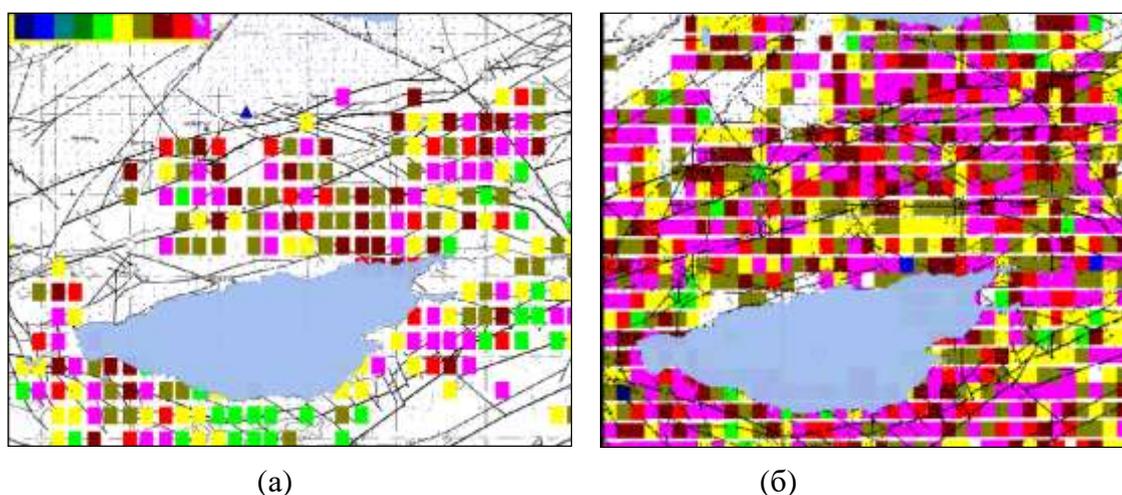


Рисунок 6. Распределение по площади отношения касательного напряжения к эффективному давлению за 1991-2021 гг. (а) и за 2021 г. (б).

В целом на всей рассматриваемой территории в 1991 - 2021 гг. можно отметить низкую интенсивность и достаточно равномерное, без образования высокоградиентных участков, распределение касательных напряжений и эффективного давления (рисунок 5 (а)). Несколько повышенные значения напряжений, а также участки среды с повышенными значениями $\tau/\rho g$, отмечены восточнее Капчагай-Чиликского сдвига.

Распределение касательного напряжения в 2021 г. более дифференцировано (рисунок 5 (б)). Зоны повышенных значений поля напряжений с относительно высокоградиентными границами отмечены на юге, юго-востоке в хребтах Терской Алатау восточнее 77° . Севернее Иссык-Куля можно отметить обширную зону повышенных значений на западе территории, простирающуюся в северном направлении от Чилик-Кеминского разлома, вблизи которого южная граница зоны характеризуется наиболее высоким градиентом значений. Также сформировались несколько незначительных по размеру зон повышенных значений τ с высокоградиентными границами между Иссык-Кулем и Алматинским разломом. Между этими зонами высокого градиента касательных напряжений значения τ понижены, соответственно, значения флюидного давления повышены, при этом значения $\tau/\rho g$ относительно высокие (рисунок 6 (б)). Всё это может означать высокую насыщенность пород земной коры флюидами.

Обсуждение результатов

Проведённое исследование подтверждает сделанные ранее выводы [2] о значительных пространственно-временных вариациях параметров НДС на уровне слабых событий в исследуемом районе Тянь-Шаня. Вероятной причиной таких быстрых изменений параметров, характеризующих напряжённое состояние пород земной коры, может быть изменение флюидного режима, в свою очередь изменяющего структуру добротности среды [7].

Выявлены следующие отклонения напряжённого состояния среды по данным мониторинга 2021 г. от фоновых характеристик периода затишья в целом:

- аномальное для региона превалирование на значительной территории близвертикальных значений углов погружения осей напряжения сжатия и близгоризонтальных значений углов погружения осей растяжения, чем обусловлено формирование областей, характеризующихся сбросовым геодинамическим типом деформирования, аномальным для Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона [1];

- увеличение неоднородности в распределении по площади коэффициента Лоде–Надаи: формирование напряжённого состояния, смещённого в сторону одноосного сжатия, мозаично перемежающееся с участками среды, характеризующихся фоновым состоянием, близким к чистому сдвигу;

- большая дифференцированность в распределении по площади касательного напряжения и формирование небольших по размеру зон с относительно высокоградиентными границами.

Чтобы оценить опасность выявленных в 2021 г. отклонений характеристик НДС от фоновых значений сопоставим их с данными исследований методом катакластического анализа в период сейсмической активизации в исследуемом районе [2] (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики НДС в исследуемом районе, полученные методом катакластического анализа в период сейсмической активизации и в 2021 г.

Параметр	Период сейсмической активизации	2021 г.
углы погружения осей сжатия	горизонтальные	вертикальные
углы погружения осей растяжения	вертикальные	горизонтальные

геодинамический деформирования	тип	взбросовый	сбросовый
тип тензора напряжений		Формирование контрастно-деформированных зон с высоко-градиентными границами	одноосное сжатие, мозаично перемежающееся со сдвигом
Характер распределения сдвиговых напряжений		протяжённые зоны высоко-градиентных значений	небольшие зоны с повышенным градиентом значений

Таким образом, с учётом результатов исследований поля напряжений в период сейсмической активизации в исследуемом районе, можно оценить современное напряжённое состояние, как аномальное по ряду параметров, однако не представляющее опасности возникновения сильного землетрясения.

В то же время появление зон с повышенным градиентом значений касательных напряжений требует наблюдения за их динамикой, поскольку их развитие может привести к ситуации, опасной формированием очага сильного землетрясения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полешко, Н.Н. Вариации механизмов очагов землетрясений на Северном Тянь-Шане и Джунгарии: связь с 22 летним циклом в магнитном поле солнца / Н.Н. Полешко, С. Досайбекова, Г.Я. Хачикян // Вестник НЯЦ РК, 2016. – Вып. 2. – С. 160-166.
2. Полешко, Н.Н. Напряжённое состояние земной коры в районе Северного Тянь-Шаня по данным механизмов очагов землетрясений/ Н.Н. Полешко, И.Л. Аристова, Н.Н. Михайлова// Материалы докл. Четвертой тектонофизической конф. в ИФЗ РАН, 3 – 8 окт. 2016 – Москва, 2016. – Т.1. – С. 200-205.
3. Тимуш А.В. Сейсмоструктура литосферы Казахстана. // Алматы, изд-во Гылым. 2011. 590 с.
4. Абаканов Т.Д., Ли А.Н., Садыкова А.Б., Силачева Н.В., Степаненко Н.П. Сейсмическое зонирование территории Казахстана в рамках Еврокод 8 // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Москва. 2016. С. 325-331.
5. Полешко Н.Н. Сейсмоструктурная обстановка по данным механизмов очагов землетрясений Джунгаро-Северо-Тянь-Шаньского региона Казахстана/Н.Н. Полешко, С. Досайбекова // Вестник АО «КазНИИСА».–2016. – №4,– С. 25-34.
6. Ребецкий Ю.Л. Методы реконструкции тектонических напряжений и сейсмоструктурных деформаций на основе современной теории пластичности/ Ю.Л. Ребецкий // Доклады РАН. – 1999. – Т. 365, № 3. – С. 392-395.
7. Полешко Н.Н., Копничев Ю.Ф., Садыкова А.Б., Хачикян Г.Я., Соколова И.Н. Сейсмоструктурная деформация и добротность среды на Северном Тянь-Шане: связь с вариациями солнечной активности. Тезисы докладов пятого международного симпозиума «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» к 75-летию со дня рождения Ю.А. Трапезникова. Бишкек. 2011. Том.1. С. 272-275.

Рецензент: доктор физ.-мат. наук Михайлова Н.Н.