



## STRESS AND STRAIN STATE OF THE KAZAKH SHIELD FROM THE EARTHQUAKE FOCAL MECHANISMS DATA

A.N. Uzbekov <sup>1,2,✉</sup>, N.N. Poleshko <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geophysical Researches, 4 Chaikina St, Almaty 050020, Kazakhstan

<sup>2</sup> Satbayev University, 22a Satpaev St, Almaty 050000, Kazakhstan

<sup>3</sup> Institute of Seismology, 75a Al-Farabi Ave, 050060, Almaty, Kazakhstan

**ABSTRACT.** The paper presents the results obtained during the study of seismicity of the Kazakh shield based on the data from seismic stations of the Institute of Geophysical Researches of Kazakhstan which are a part of the international monitoring systems. Emphasis has been placed on seismic activation in 2016–2018 in the middle part of the Central Kazakhstan arch, previously considered aseismic. The earthquake focal mechanisms determined for 40 seismic events recorded in the investigated area are based on the displacement directions of the first arriving P waves.

On the basis of the analysis of the earthquake focal mechanism data set, an assessment has been made of the present-day stress-strain state of the Earth's crust of the low-seismicity Kazakh shield. It is shown that a system of stresses in the investigated area is characterized by conditions for near-horizontal compression whose direction is consistent with the direction of movement of the Alpine geomorphostructures. It has been found that the earthquake sources in the investigated area are dominated by reverse faults and reverse-slip faults which correspond structurally to the northeast-striking and submeridional tectonic faults, thus testifying to present-day seismic activation of the northeastern thrusts.

This study allowed for concluding that the seismic events considered are human-induced, i.e. technogenic-tectonic, earthquakes. A long-term technogenic impact reducing the strength of rocks in fault zones can be a cause of critical stress drop in earthquake sources located in the Kazakh shield. The data on the character of motions and stresses in the earthquake sources influencing on shaking intensity will be used in combination with other methods for the assessment of natural and technogenic hazards related to geodynamic processes.

**KEYWORDS:** earthquake focal mechanism; seismic zone; seismicity; epicenter; fault

### RESEARCH ARTICLE

**Correspondence:** Abylay N. Uzbekov, [abylay@kndc.kz](mailto:abylay@kndc.kz)

Received: July 1, 2020

Revised: June 23, 2021

Accepted: July 12, 2021

**FOR CITATION:** Uzbekov A.N., Poleshko N.N., 2022. Stress and strain state of the Kazakh shield from the earthquake focal mechanisms data. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (1), 0571. doi:10.5800/GT-2022-13-1-0571

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КАЗАХСКОГО ЩИТА ПО ДАННЫМ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А.Н. Узбеков<sup>1,2</sup>, Н.Н. Полешко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт геофизических исследований, 050020, Алматы, ул. Чайкиной, 4, Казахстан

<sup>2</sup> Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, 050000, Алматы, ул. Сатпаева, 22а, Казахстан

<sup>3</sup> Институт сейсмологии, 050060, Алматы, пр-т Аль-Фараби, 75а, Казахстан

**АННОТАЦИЯ.** Приводятся результаты изучения сейсмичности Казахского щита по данным сейсмических станций Института геофизических исследований Республики Казахстан, входящих в международные системы мониторинга. Отмечена активизация сейсмичности в 2016–2018 гг. в центральной части Центрально-Казахстанского свода, считавшейся ранее асейсмичной. Для 40 сейсмических событий, зарегистрированных в рассматриваемом районе, построены механизмы очагов по направлениям смещений в первых вступлениях Р-волн.

На основе анализа совокупности всех полученных данных о механизмах очагов землетрясений выполнена оценка современного напряженно-деформированного состояния земной коры слабосейсмичного Казахского щита. Показано, что система напряжений на рассматриваемой территории характеризуется условиями близгоризонтального сжатия в направлении, согласующемся с направлением движения альпийских геоморфоструктур. Установлено превалирование в очагах землетрясений исследуемого региона взбросо- и взбросо-сдвиговых подвижек по плоскостям разрывов, которые находят структурное соответствие с тектоническими разломами северо-восточного и субмеридионального простирания, свидетельствующее о сейсмической активизации северо-восточных надвигов в настоящее время.

На основе проведенного исследования сделан вывод, что рассматриваемые сейсмические события являются землетрясениями, спровоцированными техногенной деятельностью человека, т.е. техногенно-тектоническими. В результате длительного техногенного воздействия, вызывающего снижение прочности пород разломных зон, в структурах Казахского щита происходит формирование очагов землетрясений с более низким уровнем критических напряжений. Сведения о характере подвижек и напряжений в очагах землетрясений, влияющих на интенсивность сотрясений, в комплексе с другими методами будут использоваться для оценки природных и техногенных опасностей, связанных с геодинамическими процессами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** механизм очагов землетрясений; сейсмогенерирующая зона; сейсмичность; эпицентр; разлом

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время, по данным сейсмических станций Института геофизических исследований Республики Казахстан, входящих в международные системы мониторинга, отмечена некоторая активизация сейсмичности центральной части Центрально-Казахстанского свода. Среди этих событий содержится большое число карьерных взрывов, выделить которые из общей массы весьма сложно [Velikanov et al., 2013]. Для их стандартной фильтрации наряду с другими параметрами учитывается характер первого движения продольных волн (Р-волн) на сейсмограмме и возможность построения механизма очага по направлениям смещений в первых вступлениях Р-волн [Mikhailova, Poleshko, 2013a]. В основе использования этих параметров для распознавания природы сейсмических событий лежат особенности распределения волн сжатия и растяжения от источников разной природы. При землетрясениях эти волны имеют квадрантное распределение, а силовым источником является двойная пара сил [Vvedenskaya, 1969].

Для событий, зарегистрированных в рассматриваемом районе, характер распределения первых вступлений

Р-волн соответствует силовому источнику двойной пары сил; для этих очагов были построены механизмы. Этот фактор, наряду с другими имеющимися сведениями, позволяет считать рассматриваемые события землетрясениями, спровоцированными техногенной деятельностью человека, т.е. техногенно-тектоническими [Adushkin, Turuntaev, 2015]. Сейсмические события проявляются в интервале глубин 5–20 км. Исследование фокальных механизмов является одним из главных способов, позволяющих определить характер напряжений, действующих в глубинных слоях земной коры, а также установить связь процессов в очагах землетрясений с тектоническими процессами в каждой конкретной зоне. Выявление таких связей очень важно для исследования считавшегося ранее асейсмичным Казахского щита. На основе анализа совокупности всех полученных данных о механизмах очагов землетрясений (МОЗ) выполнена оценка современного напряженно-деформированного состояния земной коры слабосейсмичного Казахского щита. Сведения о характере подвижек в очагах землетрясений, влияющих на интенсивность сотрясений, могут быть полезны при комплексной оценке максимальной интенсивности

сотрясений возможных землетрясений в каждой конкретной зоне.

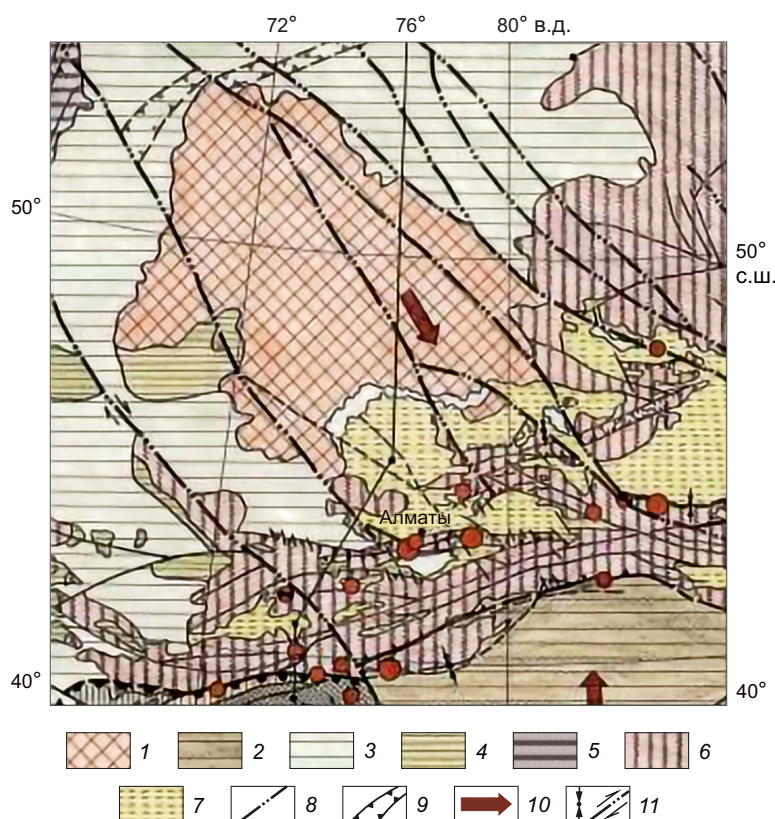
## 2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Казахский щит представляет собой обширный по площади выступ палеозойского фундамента эпигерцинской платформы, примыкающий на юго-востоке к области горообразования, а во всех других направлениях погружающийся под мезокайнозойские отложения. Вдоль его южной окраины расположена Прибалхашская впадина [Timush, 2000], вдоль западной и юго-западной границы – Тургайская и Сырдарьинская синеклизы. Это огромный свод, осложненный новейшими поднятиями (мелкосопочником), возникшими в результате активизации положительных движений, а также обширной Тенгизской впадиной. Амплитуды новейших движений возрастают с северо-запада на юго-восток от 200 до 1000 м и более. Эта особенность структуры новейшей деформации эпигерцинской плиты связана с влиянием субтрансформных разломов-

сдвигов, простирающихся из коллизионной области на северо-запад, вплоть до Русской плиты (рис. 1).

Установить характер действующих в регионе напряжений, а также связь процессов в очагах землетрясений с тектоническими процессами в каждой конкретной зоне позволяет исследование фокальных механизмов очагов. Тема весьма актуальна для считавшегося ранее асейсмичным района Казахского щита. Реконструкция процессов, происходящих в очагах землетрясений на региональном уровне, проводится на основании определения механизмов очагов по данным о направлениях смещений (знаках) в первых вступлениях продольных волн по стандартной методике [Vvedenskaya, 1969].

Эти разломы являются региональными ограничениями щита, а все структуры второго порядка (новейшие поднятия) расположены дискордантно к направлению новейших движений. Наиболее крупным поднятием щита является Центрально-Казахстанский свод, высоты которого ступенчато понижаются к северу и югу (рис. 2).

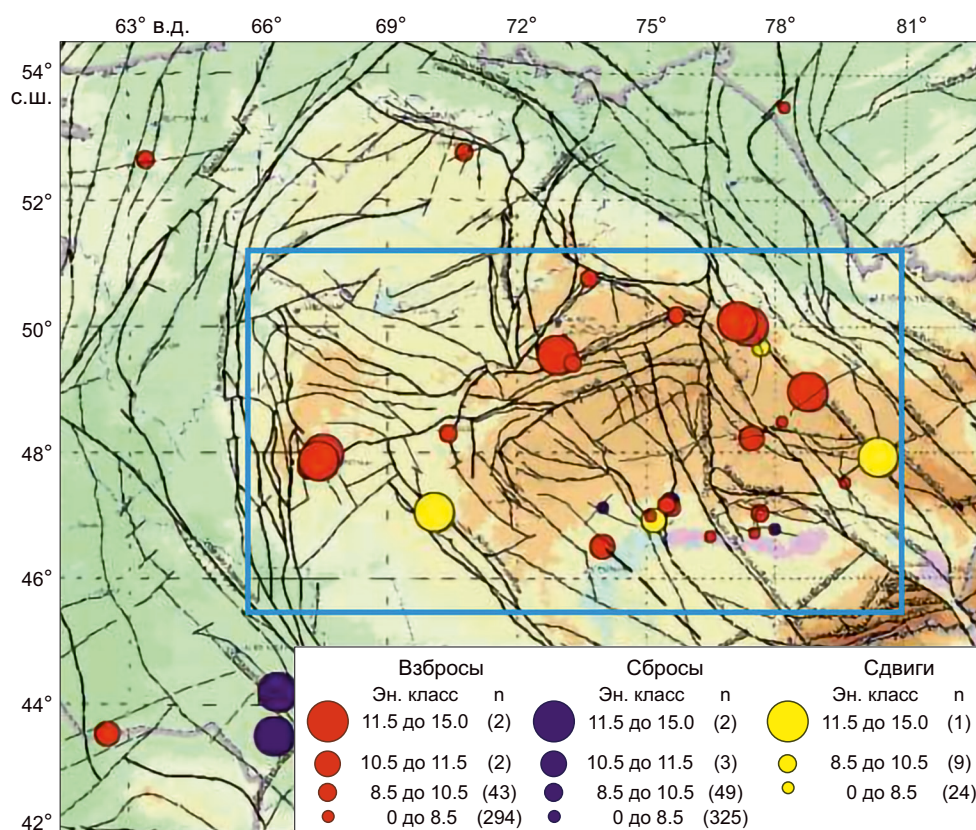


**Рис. 1.** Схема геодинамических типов альпийских геоморфоструктур по [Timush, 2011].

1 – палеозойский фундамент; 2 – мезокайнозойский чехол древней платформы; 3 – мезокайнозойский чехол молодой платформы; 4 – выходы мезозоя на платформе; 5 – орогены эпигеосинклинальные; 6 – орогены эпиплатформенные; 7 – мезокайнозойские межгорные впадины; 8 – субтрансформные разломы; 9 – палеозой-мезозойские погребенные рифты; 10 – направления движения плит; 11 – механизм движения по разломам. Красные кружки – сейсмические события.

**Fig. 1.** A scheme of geodynamic types of the Alpine geomorphostructures after [Timush, 2011].

1 – Paleozoic basement; 2 – Meso-Cenozoic cover of the ancient platform; 3 – Meso-Cenozoic cover of the young platform; 4 – Mesozoic outcrops on the platform; 5 – epigeosyncline orogenesis; 6 – epiplatform orogenesis; 7 – Meso-Cenozoic intermountain depressions; 8 – subtransform faults; 9 – Paleozoic-Mesozoic buried rifts; 10 – plate movement directions; 11 – mechanism of displacement along the faults. The red circles represent seismic events.



**Рис. 2.** Типы механизмов очагов землетрясений на карте сейсмоактивных разломов Казахстана [Mikhailova, Poleshko, 2003]. Черные линии – тектонические разломы; синий контур – исследуемая территория.

**Fig. 2.** Types of earthquake focal mechanisms on the map of seismically active faults in Kazakhstan [Mikhailova, Poleshko, 2003]. Black lines – tectonic faults; blue contour – the territory under study.

Большая часть сейсмических событий проявляется в диапазоне глубин от 2 до 20 км.

Наибольшую роль в новейшем структурообразовании играют линейменты северо-западного и северо-восточного направления, характеризующиеся устойчивостью сдвиговых смещений в совокупности с вертикальными перемещениями. Разломы северо-восточного простирания являются секущими по отношению к складчатым структурам фундамента и характеризуются вертикальными движениями (Спасский, Успенский надвиги). Кроме того, выделяется сеть разломов меридионального направления. Согласно комплексу карт общего сейсмического зонирования (ОСЗ-2015) [Abakanov et al., 2016], наибольшим сейсмopotенциалом обладают зоны вдоль разломов северо-запада, где возможны землетрясения с магнитудой 5.5 и даже 6.0, в северо-восточном направлении сейсмopotенциал зон уменьшается.

Механизмы очагов наиболее сильных землетрясений, приуроченных к Чингиз-Алакольскому и Жалаир-Найманскому региональным сдвигам, были описаны ранее [Mikhailova, Poleshko, 2013b]. В то же время в работе было отмечено отсутствие землетрясений в центральной части Центрально-Казахстанского свода, для которой по данным мониторинга получены новые сведения о сейсмичности. Кроме того, зафиксированы

землетрясения, приуроченные к разрывным структурам Тургайской и Сырдарьинской синеклиз. Для всех зарегистрированных в последнее время землетрясений получены надежные решения механизмов очагов. На основе анализа всех собранных механизмов очагов дана характеристика современных тектонических движений в различных зонах разрывных структур Туранской платформы.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЪЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Определение фокальных механизмов в Казахстане производится на основе моделирования очага в рамках теории дислокаций по знакам первых вступлений объемных волн [Vvedenskaya, 1969]. Надежность определения механизма очага в используемой методике зависит от точности определения знаков первых вступлений волн на записях землетрясений станциями сетей, а также от достаточного количества регистрирующих станций и окружения ими эпицентров. Для Центрального Казахстана, где плотность станций очень низкая, получить надежные решения МОЗ удастся только благодаря совместному использованию первых вступлений продольных и поперечных (P- и S-) волн, что предусмотрено в применяемой при решении программе Масаки [Masaki, 2002].

Для рассматриваемой платформенной территории собраны данные по механизмам очагов 40 землетрясений за период 1976–2018 гг., полученные в основном по записям сейсмических станций Республиканского государственного предприятия Институт геофизических исследований, расположенных в платформенных районах Казахстана. В меньшей степени привлекались данные сейсмических станций Сейсмологическая опытно-методическая экспедиция Республики Казахстан, которые сконцентрированы преимущественно в сейсмических зонах Тянь-Шаня и Джунгарии. Решения механизмов получены для землетрясений начиная с энергетического класса  $K=7$ , половину данных каталога составляют параметры МОЗ с  $K=9-11$ , на долю событий с  $K<9$  и относительно сильных землетрясений с  $K\geq 12$  приходится  $\approx 25\%$ .

#### 4. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ МЕХАНИЗМА ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАЗАХСКОГО ЩИТА

Для характеристики распределения очагов землетрясений по типам подвижек проведена градация по трем группам: 1) взброс (взбросо-сдвиг), 2) сброс (сбросо-сдвиг), 3) сдвиг.

Взбросовые очаги составляют 67 % и, как видно из рис. 2, распределены по всей платформенной территории от Тургайской синеклизы на севере до Прибалхашской впадины на юге. На долю очагов сбросового и сдвигового типа приходится только 21 и 13 %

соответственно. Сбросовые подвижки реализовались в очагах, зарегистрированных в зонах впадин, а именно в пределах Сырдарьинской синеклизы и Прибалхашской впадины. Сдвиговые очаги приурочены к региональным сдвигам северо-западного простирания.

#### 5. ОРИЕНТАЦИЯ ПЛОСКОСТЕЙ РАЗРЫВОВ И КИНЕМАТИЧЕСКИЙ ТИП ПОДВИЖЕК В ОЧАГАХ

Определив основные типы механизма очагов землетрясений щита, детально рассмотрим типичные дислокации в разных зонах, чтобы перейти к вопросу о связи дислокаций в очагах землетрясений с конкретными разрывными структурами (табл. 1). Нужно отметить, что по сейсмическим данным устанавливаются два равновероятных положения плоскости разрыва.

Более вероятной плоскостью разрыва можно считать плоскость, согласующуюся с геологическими структурами. Направление разрывов и характер движений в очагах исследуемого региона демонстрируют стереограммы фокальных механизмов землетрясений на фрагменте карты сейсмоактивных разломов (рис. 3).

Рассмотрим механизмы очагов землетрясений разрывных структур в направлении уменьшения сейсмopotенциала, с юго-востока на северо-запад.

**Чингиз-Алакольский сдвиг** (ограничивает мелко-сопочник с востока). Согласно комплекту карт общего сейсмического зонирования (ОСЗ-2015) [Abakanov et al., 2016], потенциал зоны разлома в платформенной

Таблица 1. Основные параметры землетрясений  
Table 1. Main parameters of earthquakes

№	Год	Время	Долгота	Широта	Глубина	MPVA	MB	K
1	2001	15:58:01.3	47.2000	70.2000	19	5.80	5.00	13.50
2	2009	8:1:11.14	48.4400	70.2000	5	-	3.70	10.00
3	2012	0:00:00	50.9966	77.4291	-	2.02	-	6.57
4	2013	23:59:48.96	46.2283	75.1693	10	3.05	-	8.07
5	2013	0:00:00	50.0345	77.0912	-	2.35	-	5.89
6	2014	6:30:3.364	49.5551	72.9682	9	5.15	-	11.65
7	2014	6:47:4.998	49.4914	72.9990	-	2.10	-	5.80
8	2015	10:17:11	50.9486	73.7769	-	3.54	-	9.32
9	2015	23:5:37.394	47.5317	77.8442	-	2.10	-	5.02
10	2016	14:48:00	50.1639	76.1835	-	2.27	-	6.32
11	2016	1:47:11	49.3947	77.9769	4.27069	3.40	-	8.50
12	2017	22:44:30	47.2446	75.4679	-	3.37	-	8.22
13	2018	8:29:00	46.7900	76.5400	22	-	3.60	9.78
14	2018	9:47:51	48.2800	77.4900	2	-	4.60	12.07
15	2018	2:08:21	46.8400	75.5000	4	-	3.30	9.10
16	2018	9:36:16	47.0700	77.6400	29	-	4.00	10.70
17	2018	1:30:06	47.9624	67.2873	-	3.60	-	8.30
18	2018	2:18:29	47.9100	67.4300	1	4.00	-	9.60
19	2019	18:30:11	51.1300	72.9700	1	-	4.00	8.91
20	2020	4:14:06	47.9619	67.5514	9.2	4.00	-	9.00

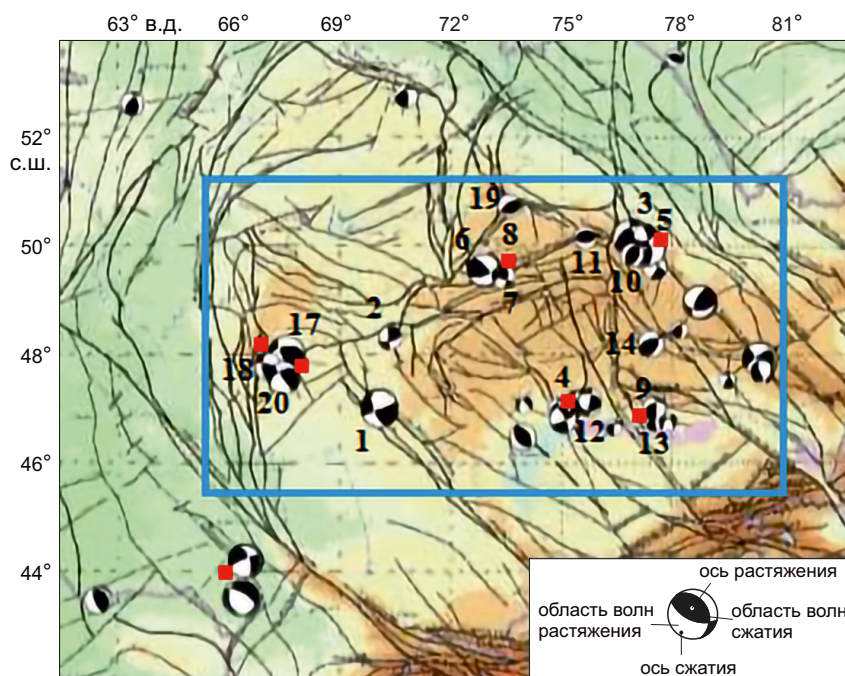
области оценивается величиной  $M \leq 5.5$  в районе Нарымского надвига и уменьшается в северо-западном направлении до величины  $M \leq 5$ .

На пересечении Чингиз-Алакольского сдвига с Нарымским надвигом, в юго-восточных отрогах хр. Акшатау, зарегистрировано два землетрясения. Наиболее сильное с энергетическим классом  $K=12$  ( $m_b=5$ ) произошло в марте 2016 г. Механизм его очага характеризуется горизонтальным сдвигом, одна из возможных плоскостей согласуется с Чингиз-Алакольским сдвигом, другая – с Нарымским надвигом. Ясное структурное объяснение находит плоскость северо-западного простирания, поскольку и направленность, и тип подвижки по ней соответствуют характеру движений Чингиз-Алакольского сдвига, тогда как сдвиговый тип подвижки по второй плоскости не согласуется с надвиговым характером Нарымского разлома. Землетрясение меньшей силы с  $K=9$  ( $m_b=3.6$ ) зарегистрировано в этом же месте в октябре 2017 г., в его очаге по обоим плоскостям разрыва подвижка характеризуется сбросом. Простирание плоскостей разрыва этого толчка аналогично простиранию плоскостей в очаге предыдущего. Однако сбросовый тип подвижки в очаге этого землетрясения не согласуется с динамическими типами разломов, к пересечению которых очаг приурочен. Здесь следует отметить, что в 2017 г. отмечалось аномальное превалирование сбросов во всех сейсмогенерирующих зонах Северного Тянь-Шаня и Джунгарии. Западнее, на пересечении Нарымского надвига

с Алакольским разломом, в 2005 г. зарегистрирован очаг с  $K=8.4$  ( $m_b=3.5$ ). Его механизм характеризуется комбинацией северо-западного сдвига и северо-восточного сдвига-взброса. В этом очаге северо-западный сдвиг находит структурное соответствие с Алакольским разломом.

Далее на северо-запад на пересечении Чингиз-Алакольского сдвига с северо-восточным разломом второго порядка, установленным по космоснимкам высокого разрешения, в хр. Канчингиз в январе 2015 г. было зарегистрировано землетрясение с  $K=9$  ( $m_b=3.6$ ). Еще два очага реализовались вдоль северо-восточного разлома на участке между Чингиз-Алакольским и Восточно-Джунгарским сдвигами. Механизмы всех трех очагов подобны и характеризуются взбросами по плоскостям разрывов северо-восточного простирания, указаны на рис. 3.

Восточнее пересечения Чингиз-Алакольского сдвига с меридиональным Центрально-Казахстанским разломом, на западной границе Семипалатинского полигона (СИП), компактно сконцентрированы очаги пяти землетрясений. На этом участке Чингиз-Алакольский сдвиг сечет серия разломов второго порядка, субпараллельных меридиональному Центрально-Казахстанскому разлому. В трех очагах из рассматриваемой зоны тип механизма характеризуется взбросо-сдвигом (1976 и 1996 гг.) либо сбросо-сдвигом (2011 г.), в одном очаге (2012 г.) произошла сдвиговая подвижка, в другом (2004 г.) – взбросовая. Во всех рассматриваемых



**Рис. 3.** Стереогаммы механизмов очагов платформенных землетрясений.

Цифрами обозначены механизмы землетрясений из табл. 1. Красные квадраты – техногенные объекты; черные линии – тектонические разломы; синий контур – исследуемая территория.

**Fig. 3.** Stereograms of the focal mechanisms of platform earthquakes.

The numbers indicate the mechanisms of earthquakes from Table.1. Red squares – man-made (technogenic) objects; black lines – tectonic faults; blue contour – the territory under study.

очагах имеются субмеридиональные плоскости, согласующиеся с меридиональным Центрально-Казахстанским разломом и с серией субпараллельных ему разломов, тогда как субширотные плоскости разрывов в трех очагах не находят структурного соответствия. Таким образом, в этой группе очагов, в том числе самом сильном с  $K=14$  ( $m_b=5.1$ ), наиболее вероятной плоскостью разрыва является крутопадающая плоскость субмеридионального простирания.

Западнее Центрально-Казахстанского разлома на пересечении Восточно-Джунгарского сдвига со Спасским надвигом в 2017 г. реализовался очаг взбросового типа с  $K=8.7$  ( $m_b=3.7$ ). Простирание обеих плоскостей согласуется со Спасским надвигом, который в этом месте меняет направление с северо-восточного на субширотное. Полное структурное соответствие со Спасским надвигом находит плоскость разрыва, падающая на юг.

Далее на северо-запад зарегистрировано еще два очага, для которых построены механизмы. На пересечении Восточно-Джунгарского сдвига с Темиртаусским разломом в 2009 г. реализовался взброс, в котором структурное соответствие с Темиртаусским разломом находит плоскость разрыва северо-восточного простирания, падающая в южном направлении. В самом северном землетрясении мелкосопочника, зарегистрированном в 2003 г. в 50 км от г. Щучинск, механизм очага характеризуется комбинацией крутого северо-западного сдвига и более пологого северо-восточного надвига. В этом очаге, как и в двух предыдущих, большее структурное соответствие находит северо-восточный надвиг, пологопадающий в южном направлении.

Таким образом, в южной части рассматриваемого отрезка Чингиз-Алакольского сдвига наиболее вероятной плоскостью разрыва очагов землетрясений является плоскость северо-западного простирания, согласующаяся с кинематикой и ориентацией Чингиз-Алакольского сдвига.

По мере движения в северо-западном направлении, с большей вероятностью в очагах землетрясений реализуются взбросы, взбросо-сдвиги по плоскостям, имеющим структурное соответствие с разломами, секущими Чингиз-Алакольский сдвиг. Это либо субмеридиональные, падающие в восточном направлении плоскости, либо северо-восточные надвиги, падающие в южном направлении.

**Жалаир-Найманский сдвиг** (ограничивает мелкосопочник с запада). Согласно действующей карте ОСР, в пределах платформенной части этого разлома выделена небольшая зона, где возможны землетрясения с магнитудой 5.5. На этом участке Жалаир-Найманского сдвига произошло два подземных толчка с магнитудой  $\geq 5$ .

Один из них, с  $K=14$ ,  $m_b=5$  (Шалгинское землетрясение), зарегистрирован в 2001 г. на участке Жалаир-Найманского сдвига вблизи населенного пункта Коскудук. Его фокальный механизм характеризуется сдвигом по обеим нодальным плоскостям, имеющим северо-западное и северо-восточное направление

[Mikhailova, Poleshko, 2005]. Каждое из этих направлений в решении механизма очага соответствует ориентации главных разломов зоны. Для выбора из двух возможных плоскостей разрыва наиболее вероятной были привлечены дополнительные имеющиеся сведения об этом очаге: направленность распространения повторных толчков и результаты макрообследования. Шалгинское землетрясение сопровождалось афтершоковой активизацией, включающей эпицентры шести повторных толчков, вытянутых в цепочку северо-восточного направления (азимут  $70^\circ$ ). Такое же направление установлено по данным макрообследования для большой оси эллипса изосейст, азимут которой характеризуется диапазоном  $50-65^\circ$ . Таким образом, разнородные сведения тяготеют к плоскости северо-восточного простирания с азимутом  $64^\circ$ , согласующейся с ориентацией Успенского разлома, по которой с большей вероятностью произошел разрыв, характеризующийся крутым левосторонним сдвигом.

Далее на северо-запад вблизи г. Джезказган с 1994 по 2005 г. произошло четыре землетрясения с  $K=9-11$  ( $m_b=3.0-5.4$ ) с эпицентрами, расположенными несколько северо-западнее разломной зоны Жалаир-Найманского сдвига, на пересечении субпараллельных ему разломов второго порядка с северной ветвью Успенского разлома. Механизмы очагов четырех землетрясений этой зоны были подробно описаны ранее [Mikhailova, Poleshko, 2013b]. Следует отметить, что знаки первых вступлений Р-волн, полученные для Джезказганских землетрясений, на одних и тех же станциях наблюдений абсолютно одинаковы, их распределение позволило получить подобные решения фокальных механизмов с высокой степенью надежности. Характер подвижек в очагах этих землетрясений определен как сдвиго-взброс по обеим нодальным плоскостям. Азимут простирания одной из плоскостей, круто падающей на северо-восток, характеризуется северо-западным направлением, которое варьируется в разных очагах от  $319$  до  $354^\circ$ . Вторая, более пологая, плоскость имеет северо-восточное простирание. Как крутые сдвиго-взбросы северо-западного простирания, так и пологие северо-восточного простирания имеют структурное соответствие с разломами, к пересечению которых приурочены очаги. В данном случае сложно выбрать наиболее вероятную из них.

Подобие фокальных механизмов Джезказганских очагов и Шалгинского очага свидетельствует, что все они сформировались в единой системе напряжений. Из рассматриваемых землетрясений Жалаир-Найманской зоны наиболее вероятную плоскость разрыва удалось установить только для очага Шалгинского землетрясения – это северо-восточный сдвиг.

**Спасский надвиг и Спасский сдвиг** – это субпараллельные разломы на северной окраине Центрально-Казахстанского свода, по данным карты ОСР эта зона не является сейсмогенерирующей. Однако по данным мониторинга в этой зоне с 2004 по 2017 г. зарегистрировано шесть землетрясений с магнитудой от 3.7 до 5.2.

На продолжении линии этой разломной зоны находится область концентрации землетрясений СИП (на востоке) и Джезказганских землетрясений (на западе) с максимальной магнитудой толчков более 5.

Механизмы определены для четырех очагов Спасской разломной зоны. Тип механизмов во всех случаях характеризуется взбросом, взбросо-сдвигом. Выше уже описан субширотный взброс, реализовавшийся в самом восточном очаге (2017 г.), расположенном на пересечении Спасского надвига с Восточно-Джунгарским сдвигом. В трех других очагах этой разломной зоны реализовались взбросо-сдвиги. Два взбросо-сдвига произошло в 35 км от г. Караганды. Один из них, с  $m_b=3$ , реализовался в 2009 г., его механизм представлен комбинацией крутых взбросо-сдвигов северо-западного и субмеридионального направления. Вторым, с  $m_b=5.2$ , реализовавшийся в 2014 г., представлен комбинацией пологого северо-восточного сдвига и крутого северо-западного взброса-сдвига [Mikhailova et al., 2015]. Сопоставление плоскостей разрыва в очаге землетрясения с тектоникой района показывает, что северо-восточный сдвиг находит ясное структурное соответствие со Спасским сдвигом. В то же время другая возможная плоскость разрыва, представляющая собой крутой северо-западный взбросо-сдвиг, согласуется с ориентацией локальных разломов в северо-западном направлении вблизи очаговой зоны. Самый западный взбросо-сдвиг этой зоны с  $m_b=3.9$  приурочен к пересечению региональных разломов северо-восточного и субмеридионального направления. С этими разломами находят структурное соответствие обе плоскости разрыва в очаге. Выбрать более вероятную, как и в предыдущем случае, по имеющимся данным затруднительно.

Таким образом, ведущий тип разрывов в очагах Спасской зоны – взбросо-сдвиги, ориентированные либо в северо-восточном направлении, отражающие активность Спасских разломов, либо в северо-западных и северных азимутах, в соответствии с секущими разломами.

**Прибалхашская впадина** является южным ограничением мелкосопочника. Южные склоны Центрального свода мелкоступенчато снижаются к оз. Балхаш, северное побережье которого сильно изрезано прямолинейными сбросами тектонического происхождения [Timush, 2000]. По данным карты ОСР, впадина находится на границе шестибалльной зоны, в пределах впадины все секущие ее разломы являются асейсмичными.

Данные мониторинга показывают, что здесь регулярно происходят землетрясения средней силы; для 12 событий с  $K=9-11$  ( $m_b=2-4$ ), зарегистрированных с 1988 по 2018 г., получены решения механизмов очагов (рис. 3). Одно землетрясение с  $K=11$  зарегистрировано в 1988 г., остальные – в 2002–2018 гг., после начала функционирования ЦСОССИ ИГИ. Возможно, ранее в этой зоне регистрировались не все происходящие подземные толчки в связи с недостатками сейсмических сетей. Эпицентры землетрясений, для которых определены

фокальные механизмы, приурочены к разнонаправленным разломам разного ранга. В этой переходной зоне от мелкосопочника к впадине отмечены механизмы очагов всех типов, однако преобладают очаги взбросового типа (58 %). Во всех очагах одна из нодальных плоскостей или обе (в очаге 1988 г.) ориентированы в соответствии с региональными разломами северо-западного простирания. Вторая нодальная плоскость согласуется с северо-восточным направлением разломов второго и третьего порядка.

Анализ фокальных механизмов землетрясений этой зоны свидетельствует о тектонической активности разломов северо-западного и северо-восточного простирания. Взбросы и сдвиги находят структурное соответствие с региональными северо-западными сдвигами либо северо-восточными надвигами, очаги сбросов – с прямолинейными тектоническими сбросами, секущими впадину.

**Разрывные структуры Тургайской и Сырдарьинской синеклиз** (вдоль западной и юго-западной границы Казахского щита), по данным карты ОСР, не являются сейсмогенерирующими. В пределах Сырдарьинской синеклизы это субпараллельные разломы северо-западного простирания, меняющие направление на субмеридиональное в пределах Тургайской синеклизы.

По данным инструментальных наблюдений, к разрывным структурам Сырдарьинской синеклизы приурочено три землетрясения с  $K=11$  ( $m_b=4.2-4.6$ ), произошедшие за период времени 2009–2014 гг., и одно землетрясение Тургайской синеклизы с  $K=9$  ( $m_b=3.8$ ), зарегистрированное в 2017 г., для которых удалось получить решение механизмов очагов.

Два очага (2009 г.) приурочены к Сырдарьинскому разлому вблизи его пересечения с Западно-Кызылкумским. В одном из них тип механизма представлен сдвигом с незначительной сбросовой составляющей, в другом – сбросом, с незначительной сдвиговой составляющей. В очагах обоих землетрясений одна из плоскостей имеет северо-западное простирание и находит ясное структурное соответствие с Сырдарьинским разломом.

Очаг землетрясения 2014 г. расположен в блоке между разломами северо-восточного и субмеридионального простирания. С ориентацией субмеридиональных разломов согласуется простирание нодальных плоскостей в очаге землетрясения, по которым реализовалась взбросовая подвижка. Подобный тип механизма реализовался и в очаге землетрясения Тургайской синеклизы в 2017 г. Очаг приурочен к той же системе субмеридиональных разломов, простирание которых здесь несколько отклоняется к востоку, и соответственно этому простиранию ориентированы плоскости в очаге.

Таким образом, в очагах землетрясений Сырдарьинской и Тургайской синеклиз ориентация плоскостей разрывов находит соответствие с ориентацией системы разломов северо-западного, субмеридионального



простирается. Наряду с преобладающим сбросовым типом механизмов очагов, отмечен также и взбросовый тип.

## 6. ОРИЕНТАЦИЯ ОСЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ СЖАТИЯ

Направление близгоризонтальных осей напряжения сжатия рассматриваемых землетрясений приведено на схеме геодинамических типов альпийских геоморфоструктур (рис. 4).

В центральной части щита на выходах палеозойского фундамента, между Чингиз-Алакольским и Жалаир-Найманским сдвигами, преобладает северо-западное направление осей сжатия, согласующееся, как видно из схемы (рис. 4), с направлением движения Туранской платформы. Особую ориентацию оси сжатия – субширотную, наряду с северо-западным направлением, можно отметить на южной границе щита в Прибалхашской впадине. Западнее Жалаир-Найманского регионального сдвига, на западной окраине щита и в пределах мезокайнозойского чехла Сырдарьинской синеклизы, близгоризонтальные оси напряжения сжатия ориентированы субмеридионально с отклонением на восток, что соответствует условиям субмеридионального регионального сжатия Средней Азии. Северо-восточная ориентация осей сжатия отмечена также в центральной части щита в зоне Спаских разломов.

Таким образом, в центральной части щита в большинстве случаев оси сжатия ориентированы в соот-

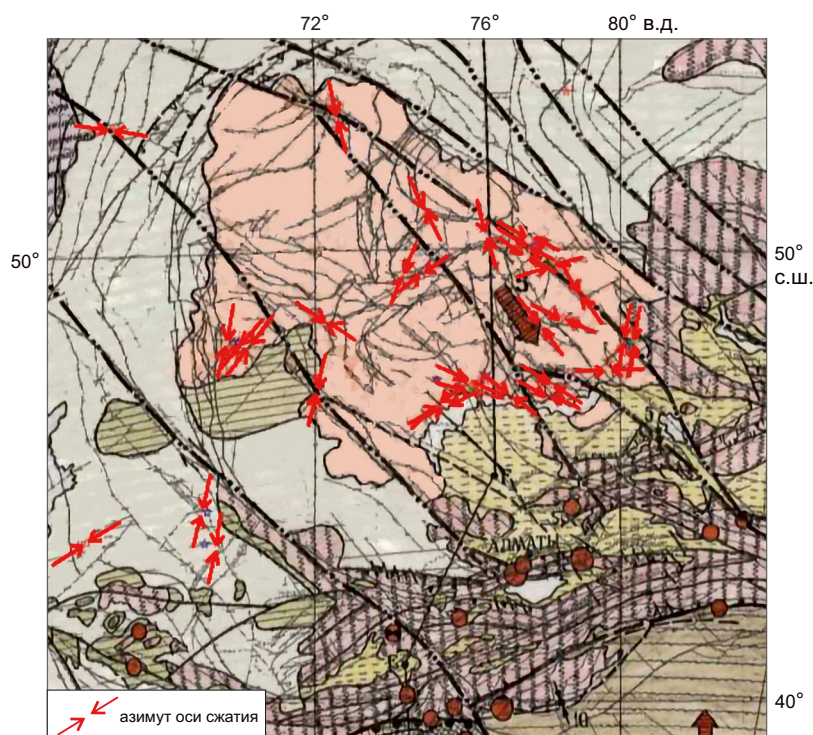
ветствии с направлением движения Туранской платформы. Западнее Жалаир-Найманского регионального сдвига направление осей сжатия больше соответствует направлению движения Таримской плиты.

## 7. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ механизмов очагов землетрясений Казахского щита позволил выявить ряд общих закономерностей.

Для рассматриваемой платформенной территории от Тургайской синеклизы на севере до Прибалхашской впадины на юге ведущим типом механизмов очагов являются взбросы (взбросо-сдвиги). Данный факт свидетельствует, что земная кора региона находится в условиях горизонтального сжатия, причем в центральной части щита оси сжатия ориентированы в соответствии с направлением движения Туранской платформы, а западнее Жалаир-Найманского регионального сдвига направление осей сжатия больше соответствует направлению движения Таримской платформы.

В подавляющем большинстве очагов структурное соответствие с разрывной тектоникой региона находят плоскости разрывов северо-восточного либо субмеридионального простирания. Данный факт может свидетельствовать о сейсмотектонической активности северо-восточных и субмеридиональных разломов, секущих северо-западные субтрансформные разломы-сдвиги, являющиеся региональными ограничениями щита.



**Рис. 4.** Азимуты горизонтальной оси напряжения сжатия на фрагменте схемы геодинамических типов альпийских геоморфоструктур [Timush, 2011]. Условные обозначения на рис. 1. Красные стрелки – азимуты оси сжатия.

**Fig. 4.** A fragment of the scheme of geodynamic types of the Alpine geomorphostructures showing the azimuths of the horizontal axis of compression stress [Timush, 2011]. See Fig. 1 for legend. Red arrow – azimuths of the compression axis.

Наряду с общими закономерностями выявлены некоторые особенности очагов землетрясений отдельных зон, в частности Прибалхашской впадины. Выявленные особенности очагов согласуются с особенностями геодинамики конкретных зон реализации землетрясений. Таким образом, выявленные общие закономерности механизмов очагов региона и особенности очагов конкретных зон свидетельствуют о структурном соответствии параметров рассмотренных сейсмических событий разрывной тектонике региона и геодинамике конкретных зон. Данный факт позволяет считать эти сейсмические события тектоническими землетрясениями.

Однако все эти землетрясения зарегистрированы в платформенной зоне после длительной эксплуатации ряда месторождений, в среде, подвергающейся техногенным воздействиям (горные работы, подземные взрывы и др.). Отличие рассмотренных сейсмических событий от природных тектонических землетрясений заключается в том, что они не произошли бы на территории данного региона, если не было бы влияния и опосредованного участия техногенных факторов, которые становятся в конечном итоге триггером этих коровых землетрясений. Подобные землетрясения следует отнести к техногенно-тектоническим [Masaki, 2002]. В.В. Адушкин отмечал: «Очаговые зоны таких землетрясений образуются как вблизи производства работ, так и на значительном расстоянии, которое определяется особенностями тектонического строения и изменившимися потоками энергии и флюида. Само землетрясение может произойти в любое время без какой-либо связи с расписанием техногенных воздействий. Основной вклад в энергию этих землетрясений вносят тектонические напряжения».

Очаги подобных техногенно-тектонических землетрясений образуются в верхних слоях земной коры и, как мелкофокусные землетрясения, могут обладать высокой интенсивностью колебаний, сопровождаемая катастрофическими последствиями локального или регионального характера [Adushkin, Turuntaev, 2015].

Таким образом, рассматриваемая платформенная территория Казахского щита после длительного техногенного воздействия становится сейсмически опасной, здесь уже зарегистрированы землетрясения с магнитудой  $>5$  и выделены сейсмогенерирующие зоны с потенциалом  $\leq 6$ .

Приведенные результаты позволяют особо отметить зону Спасских разломов, на всем протяжении которых уже зарегистрированы землетрясения с магнитудой  $m_b=4-5$ , причем их очаги характеризуются взбросовым типом механизма, характеризующегося наиболее мощным и интенсивным излучением.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение хотелось бы отметить следующее.

Установлено превалирование в очагах землетрясений исследуемого региона взбросо-взбросо-сдвиговых подвижек. Анализ построения механизмов очагов

сейсмических событий осуществлялся по методике А.В. Введенской.

Показано, что система напряжений на рассматриваемой территории характеризуется условиями близгоризонтального сжатия в направлении, согласующемся с направлением движения альпийских геоморфоструктур. Отмечено структурное соответствие плоскостей разрывов в очагах землетрясений тектоническим разломам северо-восточного и субмеридионального простирания, свидетельствующее о сейсмотектонической активизации северо-восточных надвигов в настоящее время.

Обращено внимание на то, что длительное техногенное воздействие на платформенные структуры Казахского щита вызывает снижение прочности пород разломных зон, активизацию деформационных процессов, приводя к формированию очагов землетрясений с более низким уровнем критических напряжений. И, как следствие, происходит формирование новых сейсмогенерирующих зон в регионе.

Основополагающим результатам проявления сейсмичности, скорее всего, способствовали горные работы (взрывы на карьерах), выемка и перемещение горной породы спровоцировали землетрясения.

## 9. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

## 10. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## 11. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Abakanov T.D., Li A.N., Sadykova A.B., Silacheva N.V., Stepanenko N.P., 2016. Seismic Sounding in the Kazakhstan Area According to Eurocode 8. In: Tectonophysics and Topical Problems in Geosciences. Proceedings of 4th Tectonophysical Conference at Institute of Physics of the Earth (October 03–08, 2016). Vol. 1. IPE RAS Publishing House, Moscow, p. 325–331 (in Russian) [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 науки о Земле: Материалы Четвертой тектонофизической конференции в ИФЗ РАН (03–08 октября 2016 г.). М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2016. Т. 1. С. 325–331].

Adushkin V.V., Turuntaev S.B., 2015. Technogenic Seismicity – Induced and Triggered. Institute of Geosphere Dynamics, Moscow, 364 p. (in Russian) [Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.]

Masaki N., 2002. Determination of Focal Mechanism Solution Using Initial Motion Polarity of P and S Waves. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 130 (1-2), 17-29. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(01\)00306-5](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(01)00306-5).

Mikhailova N.N., Poleshko N.N., 2003. About Mechanisms of Earthquake Focuses of Central Kazakhstan. *NNC RK Bulletin. Geophysics and Non-Proliferation Problems* 2, 100-105 (in Russian) [Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н. О механизмах очагов землетрясений Центрального Казахстана // Вестник НЯЦ РК: Геофизика и проблемы нераспространения. 2003. Вып. 2. С. 100-105].

Mikhailova N.N., Poleshko N.N., 2005. Earthquake Sources Mechanisms of Eastern Kazakhstan. *NNC RK Bulletin* 2, 142-146 (in Russian) [Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н. О механизмах очагов землетрясений Восточного Казахстана // Вестник НЯЦ РК. 2005. Вып. 2. С. 142-146].

Mikhailova N.N., Poleshko N.N., 2013a. Focal Mechanisms as Discriminating Criterion. *NNC RK Bulletin* 2, 72-76 (in Russian) [Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н. Механизмы очагов как критерий распознавания взрывов // Вестник НЯЦ РК. 2013. Вып. 2. С. 72-76].

Mikhailova N.N., Poleshko N.N., 2013b. Seismicity and Stress and Strain State in Seismically Quiet Regions of Kazakhstan. *NNC RK Bulletin* 2, 140-153 (in Russian) [Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н. Сейсмичность и характер напряженно-деформированного состояния в слабосейсмичных районах Казахстана // Вестник НЯЦ РК. 2013. Вып. 2. С. 140-153].

Mikhailova N.N., Poleshko N.N., Velikanov A.Ye., Uzbekov A.N., 2015. To the Earthquake near Karaganda of 21 June 2014. *NNC RK Bulletin* 3, 94-100 (in Russian) [Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н., Великанов А.Е., Узбекиков А.Н. О землетрясении близ Караганды 21 июня 2014 года // Вестник НЯЦ РК. 2015. Вып. 3. С. 94-100].

Timush A.V., 2000. Tectonic Structures and Upper Crustal Seismogenerating Zones. *MES RK IS, Almaty*, 364 p. (in Russian) [Тимуш А.В. Тектонические структуры и сейсмогенерирующие зоны верхней части земной коры. Алматы: МОН РК ИС, 2000. 364 с.].

Timush A.V., 2011. Seismotectonics of the Lithosphere of Kazakhstan. *Luxe Media Group, Almaty*, 590 p. (in Russian) [Тимуш А.В. Сейсмотектоника литосферы Казахстана. Алматы: Luxe Media Group, 2011. 590 с.].

Velikanov A.Ye., Mikhailova N.N., Sokolova I.N., Aristova I.L., Mukambayev A.S., 2013. Investigation of Industrial Blasts Sources on the Territory of Kazakhstan. *NNC RK Bulletin* 2, 77-85 (in Russian) [Великанов А.Е., Михайлова Н.Н., Соколова И.Н., Аристова И.Л., Мукамбаев А.С. Изучение источников промышленных взрывов на территории Казахстана // Вестник НЯЦ РК. 2013. Вып. 2. С. 77-85].

Vvedenskaya A.V., 1969. Investigation of Stresses and Faults in Earthquake Foci by the Theory of Dislocations. *Nauka, Moscow*, 136 p. (in Russian) [Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.].