

Аномальные вариации полного электронного содержания ионосферы и геодинамические условия для Учтурфанского землетрясения 22.01.2024 магнитудой 7

С. А. Имашев, С. И. Кузиков

Научная станция РАН в Бишкеке, Бишкек, 720049, Кыргызстан
E-mail: sanzhar.imashev@gmail.com

Представлен анализ геолого-геофизических условий и аномальных вариаций полного электронного содержания в ионосфере (ПЭС) для Учтурфанского землетрясения (22.01.2024, 18:09 UTC (*англ.* Universal Time Coordinated)). Эпицентр главного сейсмического события располагался в 50 км к западу от населённого пункта Учтурфан и был приурочен к зоне сочленения южной границы гор Тянь-Шаня и Таримской впадины. Одна из нодальных плоскостей разрыва в очаге в среднем имеет простирание по азимуту 235° , северо-западное падение под углом 44° и направление смещения 46° от горизонта. Характеристики фокального механизма очага и положение гипоцентра основного толчка максимально близки к геолого-геодезическим параметрам Майданского левостороннего взбросо-сдвига. Афтершоковый рой образует область шириной ~ 25 км, вытянутую на 60 км в северо-восточном направлении. Для анализа пред- и косейсмических вариаций ПЭС были обработаны глобальные карты распределения ПЭС центра анализа данных JPL (*англ.* Jet Propulsion Laboratory). Анализ ПЭС над эпицентром главного события показал, что на фоне суточной периодичности с максимумами в интервале 05:00–09:00 UTC наблюдается рост значений после 09.01.2024 и экстремальное значение достигается после главного толчка 22.01.2024. Незначительные вариации индекса геомагнитной активности за январь 2024 г. свидетельствуют о том, что наблюдаемые аномальные значения ПЭС не являются следствием магнитных бурь. Карты площадного распределения статистических оценок ПЭС перед главным событием (09.01.2024) и после него (23.01.2024) показали наличие аномальных повышенных значений, локализованных в пространстве и во времени. При этом положение аномальной зоны после главного события имело вытянутую форму вдоль Майданского разлома и зоны афтершокового роя.

Ключевые слова: землетрясение, Учтурфан, полное электронное содержание, аномалии, Майданский разлом

Одобрена к печати: 04.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-87-98

Введение

На территории Китая 22 января 2024 г. в 18:09 UTC в непосредственной близости к границе Кыргызстана было зафиксировано сильное землетрясение магнитудой $M = 7$ с эпицентром в точке с координатами $41,256^\circ$ с. ш., $78,654^\circ$ в. д. Толчки ощущались на сопредельных территориях Кыргызстана, Казахстана, Узбекистана и России (Абдыраева и др., 2024). Помимо этого, данное сейсмическое событие характеризуется многочисленными афтершоками, количество которых к концу марта 2024 г. превысило 3400 событий (https://seismo.kg/different/uqturpan_earthquake.php).

Учитывая вышеизложенное и значимую силу землетрясения для Тянь-Шаньского региона, а также особенности его проявления, представляет интерес анализ геолого-геофизических и сейсмических условий его протекания. Это событие вызывает интерес с точки зрения анализа предсейсмических аномалий в различных геофизических полях, в частности в ионосфере.

Высокая концентрация заряженных частиц в ионосфере делает её чувствительной областью атмосферы для проявления процессов солнечной и атмосферной активности, антропогенной деятельности, колебаний земной поверхности, таких как землетрясения и сильные взрывы (Oikonomou et al., 2021). В связи с расширением пространственного охвата станциями глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и совершенствованием технологий

обработки их данных в последнее время активно проводятся исследования ионосферных возмущений, связанных с процессами подготовки сильных сейсмических событий. В частности, растёт количество исследований, посвящённых анализу предсейсмических аномалий в вариациях полного электронного содержания в ионосфере (ПЭС (*англ.* Total Electronic Content — TEC)) в различных сейсмически активных регионах мира (Имашев, Свердлик, 2022; Oikonomou et al., 2021; Yao et al., 2012).

Цель данной работы — анализ аномалий вариаций ПЭС в ионосфере, связанных с землетрясением вблизи Учтурфана 22.01.2024 в 18:09 UTC, а также геолого-геофизических и сейсмических условий протекания этого события.

Геолого-геофизические и сейсмические условия

В первых десятилетиях 20-го века А.Л. Вегенер научно обосновал на обширном фактическом геологическом материале возможность больших горизонтальных перемещений материковых плит по поверхности Земли (Вегенер, 1984). В 70-х гг. прошлого столетия на основе изучения палеомагнитных аномалий в океанах была представлена схема дрейфа Индии к Евразии за последние 70 млн лет, что привело к их столкновению (коллизии) и образованию между ними целого ряда высокогорных складчато-надвиговых систем шириной более 3 тыс. км (Molnar, Tarponnier, 1975). Позднее, с развитием технологий высокоточного ГНСС-позиционирования, появились данные о современном процессе пространственного сближения равнинных фронтальных частей Индии и Азии со скоростью 3,5 см/год (Kuzikov, 2019; Zhou et al., 2016).

Эпицентр исследуемого сейсмического события 22.01.2024 расположен в 50 км к западу от населённого пункта Учтурфан и приурочен к зоне сочленения южной границы гор Тянь-Шаня и Таримской впадины (пустыня Такла-Макан). В более крупном плане это место находится у южного подножия Кокшаальского хребта, по водоразделу которого проходит государственная граница между Китаем и Кыргызстаном (*рис. 1*).

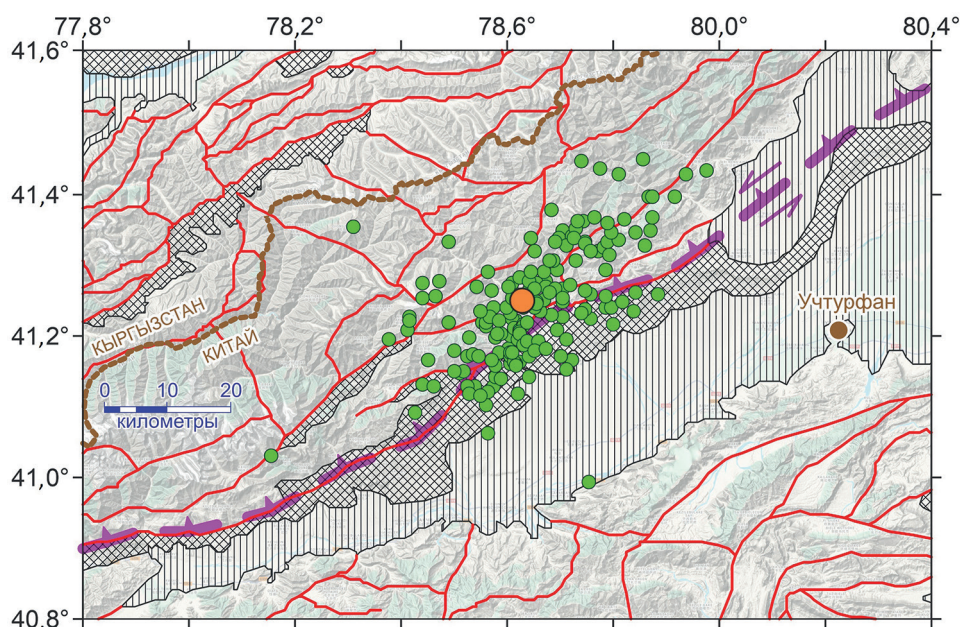


Рис. 1. Геологическая схема распределения объединённых четвертичных образований (вертикальная штриховка, ≤ 800 тыс. лет), кайнозойских отложений (двойная штриховка, 0,8–35 млн лет), палеозойских образований (без штриховки, 250–550 млн лет), активных разломов (красные линии). Майданский левосторонний взбросо-сдвиг (утолщённый пунктир с направлением падения). Эпицентр Учтурфанского землетрясения 22.01.2024, 18:09 UTC, $M = 7$ (оранжевый маркер), его афтершоки (180 событий, зелёные) за 22.01.2024–31.03.2024

На *рис. 1* кроме эпицентра основного сейсмического события ($M = 7$) отражено положение в плане 180 афтершоков магнитудой 3,9–5,8, зафиксированных от момента основного события в течение более чем двух месяцев (до 01.04.2024) на территории 40–42° с. ш. и 77–80° в. д. (<https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards>). При первом беглом визуальном восприятии возникает впечатление хаотичного распределения афтершоков, но при детальном рассмотрении из них выделяются отдельные линейные структуры, которые могут нести дополнительную информацию для этого геодинамического процесса. Важно обратить внимание на северо-восточную вытянутость на ~60 км и шириной ~25 км зоны основной массы афтершоков, концентрирующихся вокруг главного сейсмического события. Отметим, что за последние 10 лет (2014–2023) на исследуемом участке (40–42° с. ш., 77–80° в. д.) ежегодно фиксировалось 5–14 (в среднем до 9) сейсмических событий с магнитудой 4,0–5,4 (в среднем 4,6). Такие факты свидетельствуют о присутствии здесь тектонического фактора, постоянно провоцирующего сейсмическую активность указанного выше уровня и, скорее всего, связанного с процессом Индо-Азиатской коллизии.

Кроме сейсмических событий на фоне цифрового рельефа (см. *рис. 1*) отражено распределение основных геологических элементов, которые способствуют пониманию тектонической структуры и активности для этого участка земной коры. Построение этой схемы было основано на компиляции данных из Геологической карты Кыргызской Республики масштаба 1:500 000 (Геологическая..., 2008) и Геологической карты гор Тянь-Шаня Китая и прилегающих территорий масштаба 1:1 000 000 (Геологическая..., 2007). Для характеристики современных сейсмических событий из множества геологических таксонов и структурных элементов интерес могут представлять наиболее молодые породные образования и разрывные нарушения земной коры. На сопредельной территории Кыргызстана по космогеодезическим данным (Kuzikov, 2019) отмечаются современные движения по разломам, разделяющим четвертичные (с возрастом до 800 тыс. лет) и кайнозойские образования (с возрастом 0,8–35 млн лет). Подобное обобщение участков развития сравнительно молодых пород в геологическом плане и сопряжённые с ним разрывы земной коры могут служить признаками проявления активности в земной коре. Кроме этого, современная активность разломов может выражаться в отчётливом их проявлении в пониженных формах рельефа.

В связи с вышеизложенным на *рис. 1* обращает на себя внимание северо-восточное простираие четвертичных и кайнозойских образований, что свидетельствует о сравнительно молодой складчатости с образованием пониженных (впадин) и повышенных (хребтов) форм рельефа. Кроме этого, значительная доля разломов исследуемого района усложняет такую региональную складчатую структуру и также имеет северо-восточные румбы простираия. Также эпицентр основного землетрясения и облако его афтершоков пространственно приурочены к генерализированной линии Майданского разлома (см. *рис. 1*), который протягивается с северо-востока на юго-запад, имеет падение плоскости сместителя на северо-запад и является левосторонним взбросо-сдвигом по геологическим и космогеодезическим данным (Qiao et al., 2017). При более мелкомасштабном обобщении Майданский разлом может входить в сейсмогенную Гиссаро-Кокшаальскую зону разрывных нарушений (Губин, 1983). В контексте этой работы могут представлять интерес оценки по фокальным механизмам или кинематическим перемещениям в очаге исследуемого землетрясения. К настоящему времени известны публикации с предварительными расчётами по разным вариантам механизмов в очаге основного Учтурфанского землетрясения и его афтершоков (Абдыраева и др., 2024; Соколова и др., 2024). Разные методики расчёта механизмов очага землетрясения приводят к различию их одноимённых параметров, кроме этого, более детальная обработка и уточнение входных данных позволяют корректировать параметры фокальных механизмов очага. Приведём для рассмотрения последние на текущий момент параметры очага основного события Учтурфанского землетрясения 22.01.2024 из публикаций и интернет-источников (*таблица*).

Представленные решения о гипоцентре, силе и параметрах вероятных плоскостей разрушения в очаге исследуемого землетрясения показывают уровень расхождения данных, полученных от разных агентств. Для увязки этих данных с геологической структурой важны оценки

пространственной ориентировки нодальных плоскостей и направления смещения по ним. В *таблице* только в первой строчке данные ИС НАН КР имеют важное отличие от остальных решений, которые между собой имеют непринципиальные численные вариации. По данным ИС НАН КР, первая вероятная плоскость разрушения в очаге имеет западное простирание (251°) и падение под углом 51° от горизонта в северных румбах (341°), по $SLIP = 124^\circ$ смещение по этой плоскости идентифицируется как правый сдвиг-взброс. Вторая нодальная плоскость, по данным ИС НАН КР, простирается в северной четверти (25°) и падает в восточном направлении (115°) под углом 50° , смещение по ней при $SLIP = 56^\circ$ будет левым сдвиг-взбросом. Все остальные строчки *таблицы* можно охарактеризовать средними по ним параметрами, первая плоскость будет иметь юго-западное простирание (235°) и падение на северо-запад (325°) под углом 44° , $SLIP = 46^\circ$ свидетельствует о левом сдвиг-взбросе. Вторая средняя нодальная плоскость имеет восточное простирание (109°) и падение на юг (199°) под углом 61° , параметр $SLIP = 124^\circ$ говорит здесь о правом сдвиг-взбросе.

Параметры гипоцентра и нодальных плоскостей для Учтурфанского землетрясения 22.01.2024, полученные различными агентствами

Гипоцентр			Магнитуда	Нодальные плоскости, град						Агентство	Источник
°с. ш.	°в. д.	Глубина, км		STK		DIP		SLIP			
41,267	78,567	12,0	$M_{PV} = 6,8$	251	25	51	50	124	56	ИС НАН КР	(Абдыраева и др., 2024)
41,294	78,594	27,4	$M_w = 7,0$	250	109	42	55	59	115	CEA-IGP	(Соколова и др., 2024)
41,380	78,610	10,0	$M_S = 7,3$	232	107	42	62	43	124	ФИЦ ЕГС РАН	(Соколова и др., 2024)
41,190	78,560	16,1	$M_w = 7,1$	236	110	48	57	47	127	GCMT	www.globalcmt.org
41,455	78,837	15,5	$M_w = 7,2$	237	111	17	79	38	104	AUST	www.isc.ac.uk
41,294	78,594	22,0	$M_w = 7,1$	234	105	50	53	51	127	IPGP	www.isc.ac.uk
41,263	78,659	22,0	$M_w = 6,9$	221	108	61	56	40	144	NEIC	www.isc.ac.uk
41,256	78,654	13,0	$M_{ww} = 7,0$	235	113	45	62	42	126	USGS	www.usgs.gov

Примечание: STK (от *англ.* strike) — азимут простирания, DIP — угол падения, SLIP — угол направления смещения; M_w — магнитуда моментная по Канамори; M_{ww} — магнитуда в момент W-фазы; M_S — магнитуда по поверхностной волне; M_{PV} — магнитуда по объёмным волнам; ИС НАН КР — Институт сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики; CEA-IGP — *англ.* China Earthquake Administration, Institute of Geophysics; ФИЦ ЕГС РАН — Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН; GCMT — *англ.* Global Centroid Moment Tensor (Catalog); AUST — *англ.* Geoscience Australia; IPGP — *фр.* Institut de Physique du Globe de Paris; NEIC — *англ.* National Earthquake Information Center; USGS — *англ.* United States Geological Survey.

Таким образом, первая средняя нодальная плоскость по *таблице* с параметрами $STK = 235^\circ$, $DIP = 44^\circ$ и $SLIP = 46^\circ$ максимально близка к геолого-геодезическим параметрам Майданского левостороннего взбросо-сдвига. Отсюда следует, что Учтурфанское землетрясение 22.01.2024 может быть связано именно с этим разрывом земной коры. Как следствие такого предположения, с учётом пространственных позиций линии разлома на поверхности земли и гипоцентра события, угол возможного падения плоскости Майданского разлома не противоречит вариантам *таблицы*.

Данные о состоянии ионосферы и методика обработки

Для исследования аномальных вариаций ПЭС, связанных с подготовкой и развитием сейсмического процесса, были использованы глобальные карты ПЭС (*англ.* Global Ionospheric

Map — GIM). Такие карты представляют собой пространственное распределение ПЭС по земному шару за фиксированные промежутки времени (чаще всего — 1 ч). Данные такого рода предоставляются различными центрами анализа данных ионосферы IAACs (*англ.* Ionosphere Associated Analysis Centers) международной службы IGS (*англ.* International GNSS Service) (Тертышников, Большаков, 2010; Hernández-Pajares et al., 2009). Для исследования пространственно-временных аномалий в вариациях ПЭС в период до и после Учтурфанского землетрясения были проанализированы глобальные карты ПЭС, предоставляемые центром анализа JPL (*англ.* Jet Propulsion Laboratory) через архив данных ИЗМИРАН (Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН) (<https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/grif/Maps/TEC/>). В настоящей работе глобальные карты имеют стандартное пространственное разрешение ($2,5^\circ$ по широте и 5° по долготе) и дискретизацию по времени $\Delta t = 1$ ч.

Для исключения аномалий, связанных с мощными и продолжительными возмущениями магнитосферы, был использован индекс экваториальной геомагнитной активности Dst по данным Центра земного и космического магнетизма Университета Киото, Япония (*англ.* World Data Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Kyoto, Japan) (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>).

Данные по главному событию и его основным афтершокам были взяты с сайта Геологической службы США (USGS) (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us70001sze>).

Из-за наличия сезонных вариаций уровня ПЭС во временных рядах целесообразно использовать не абсолютные их значения, а приращения ПЭС относительно среднего за предыдущий период (ΔTEC). Например, при поиске аномальных вариаций можно рассматривать значения для каждого момента времени в виде модуля отклонения ПЭС от своего среднего значения за предыдущие семь дней (Свердлик, Имашев, 2019). В частности, значения ΔTEC для 12:00 будет рассчитано, как отклонение по абсолютной величине от среднего по всем 12:00-часовым значениям ПЭС за предыдущие семь суток.

Для выделения аномалий ΔTEC был использован классический критерий превышения 3σ (стандартного отклонения), значения которого рассчитано по предыдущим семи суткам. Для этого была использована z -оценка (z -score), которая показывает, насколько текущее значение удалено от среднего значения в единицах стандартного отклонения.

Результаты и обсуждение

Для предварительного анализа были обработаны временные ряды вариаций ПЭС над эпицентром главного события с дальнейшим расширением этой процедуры на территорию $30\text{--}46^\circ$ с. ш. и $55\text{--}95^\circ$ в. д. для выявления аномалий во времени и пространстве. На *рис. 2* приведено распределение ПЭС над эпицентром основного события ($41,256^\circ$ с. ш., $78,654^\circ$ в. д.) за январь 2024 г.

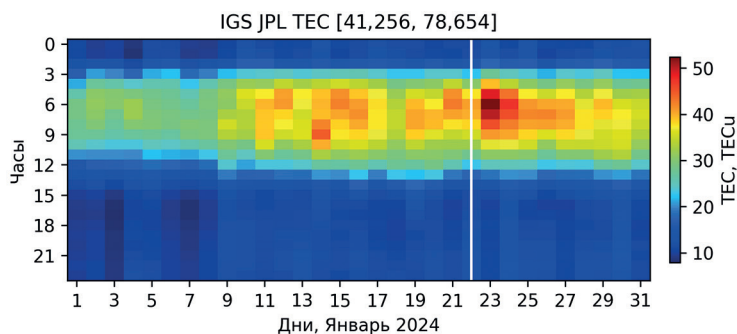


Рис. 2. Вариации ПЭС над эпицентром главного события ($41,256^\circ$ с. ш., $78,654^\circ$ в. д.). Вертикальная линия — момент землетрясения 22.01.2024

Из рис. 2 видно, что на фоне суточной периодичности дневные максимумы ПЭС проявляются в интервале 05:00–09:00 UTC (11:00–15:00 местного времени). В этой временной зоне наблюдается рост уровня максимальных дневных значений ПЭС после 09.01.2024 и экстремально высокие показатели ПЭС зафиксированы 23 января, на следующий день после главного толчка 22.01.2024. Для исключения аномалий ПЭС, возникших в результате возмущений магнитосферы Земли, наряду с вариациями ПЭС (рис. 3а) были приведены временные ряды индекса экваториальной геомагнитной активности *Dst* (рис. 3б).

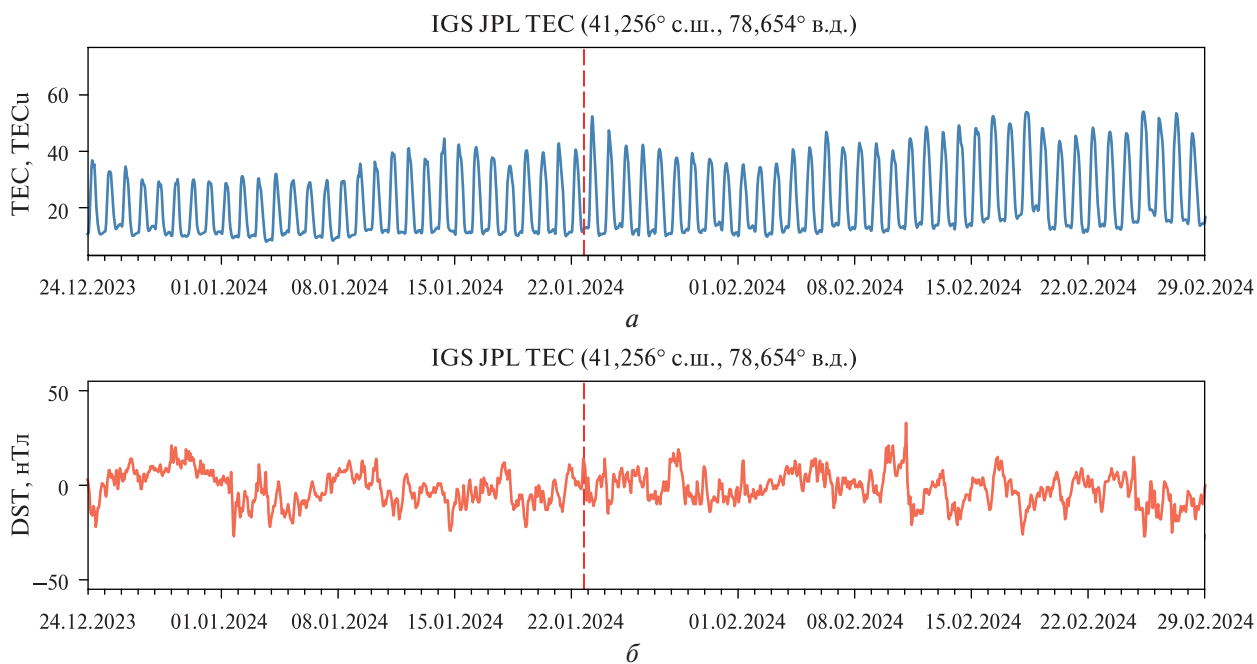


Рис. 3. Вариации ПЭС (а) над эпицентральной областью и индекса *Dst* (б) за период 24.12.2024–29.02.2024. Вертикальной линией обозначен момент главного события 22.01.2024

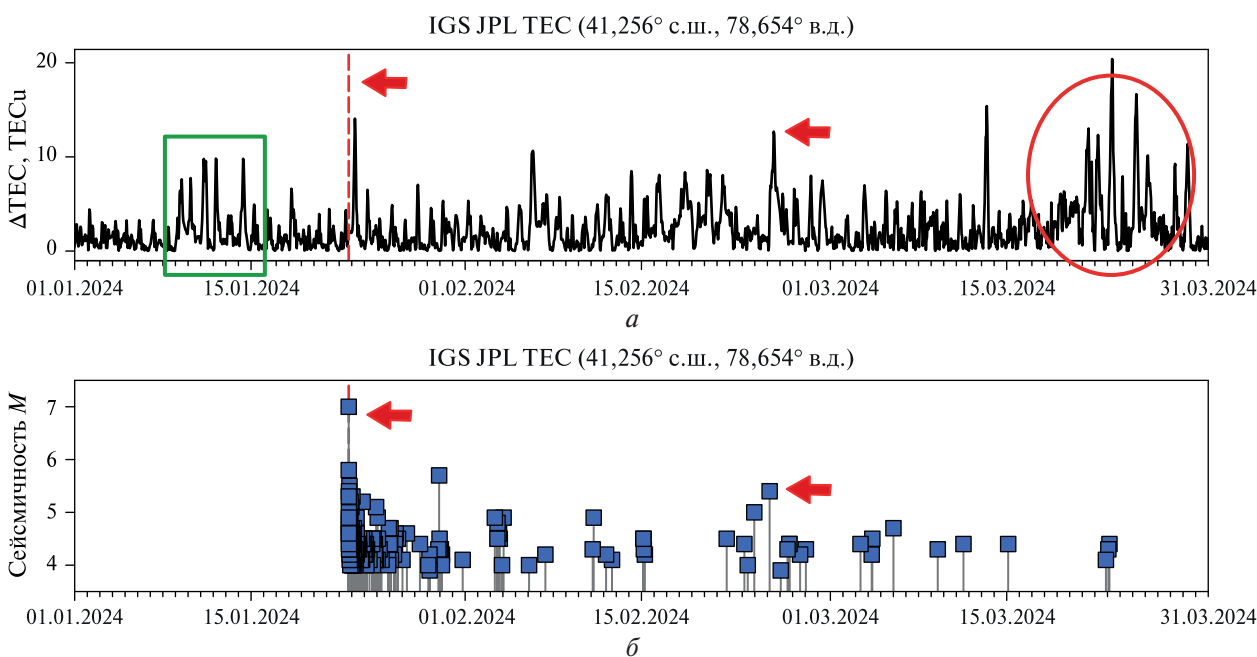


Рис. 4. Вариации ΔТЕС над эпицентром главного события за период 01.01.2024 – 31.03.2024 (а) и сейсмичность роя Учтурфанских землетрясений $M > 4$. Пунктиром обозначен момент главного события 22.01.2024 UTC (б)

На графиках *рис. 3* временные интервалы длительностью приблизительно в 1 мес до и после главного сейсмического события характеризуются незначительным уровнем вариаций параметра *Dst* без значимых магнитных возмущений. Это даёт основание рассматривать аномальные значения ПЭС как следствие активизации тектонических процессов в литосфере (Свердлик, Имашев, 2019; Oikonomou et al., 2021).

Рассчитанные временные ряды ΔTEC могут содержать различные всплески и области повышенных значений, которые можно соотнести с развитием сейсмического процесса (*рис. 4*, см. с. 92).

Во-первых, из анализа графиков следует, что в начале января 2024 г. выделяется область повышенных значений ΔTEC (обозначено прямоугольником), которые могут быть связаны с процессами подготовки исследуемых сейсмических событий. Во-вторых, повышенные всплески ΔTEC (показаны стрелками) коррелируют с наступлением сильных сейсмических событий, в частности — с главным толчком 22.01.2024 и сильным афтершоком ($M = 5,4$) 25.02.2024. Кроме этого, выделяется область длительных повышенных значений ΔTEC в конце марта 2024 г. (выделено овалом), которая проявляется при отсутствии каких-либо значимых афтершоков. Из анализа вариаций индекса *Dst* следует, что источником этих аномалий в течение последней декады марта была магнитная буря (*рис. 5*).

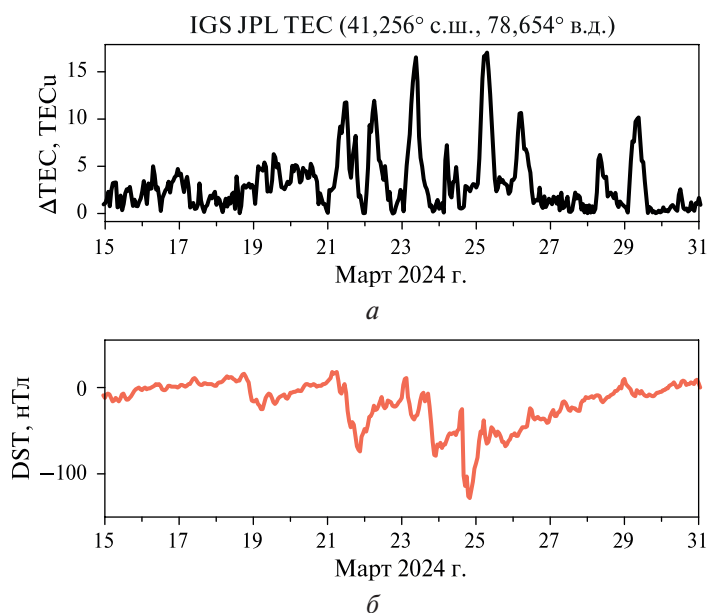


Рис. 5. Вариации ΔTEC над эпицентром главного события (*a*) и индекса *Dst* (*б*) за период 15.03.2024–31.03.2024

На *рис. 6* (см. с. 94) приведены вариации z -оценки ПЭС над эпицентром главного толчка и проявленная сейсмическая активность в течение этого времени.

На графике ПЭС (см. *рис. 6a*) 8–10 января характеризуется высоким уровнем аномальности (~ 10), что на фоне спокойного магнитного поля января 2024 г. может быть связано с процессом подготовки главного толчка.

Помимо анализа вариаций ПЭС и его производных (ΔTEC , индекса аномальности в виде z -оценки) над эпицентром, также представляет интерес и их динамика в пространстве вокруг очаговой зоны. На *рис. 7* (см. с. 94) представлены карты распределения вариаций z -оценки ПЭС по площади в моменты времени аномальных уровней ПЭС над эпицентром.

Поскольку за январь 2024 г. построено 744 (24×31 день) карты площадного распределения z -оценок ПЭС (аналог *рис. 7*), предлагается привести их к интегральной форме. Например, построим карту распределения по площади количества случаев (часов) со значениями ПЭС, превышающими 3σ (*рис. 8*, см. с. 95). На двух нижних графиках (22.01.2024)

аномалии имеют северо-восточное простирание, которое согласуется с направлением Майданского разлома.

Из рис. 8 следует, что за весь январь 2024 г. аномальные значения ПЭС так или иначе проявились сравнительно локально и достаточно близко к эпицентральной области события. Из опыта анализа аномалий ПЭС и температуры атмосферы следует, что чаще всего зоны таких аномалий находятся не над эпицентром сейсмического события, а несколько смещены (Имашев, Свердлик, 2022; Свердлик, Имашев, 2019, 2020).

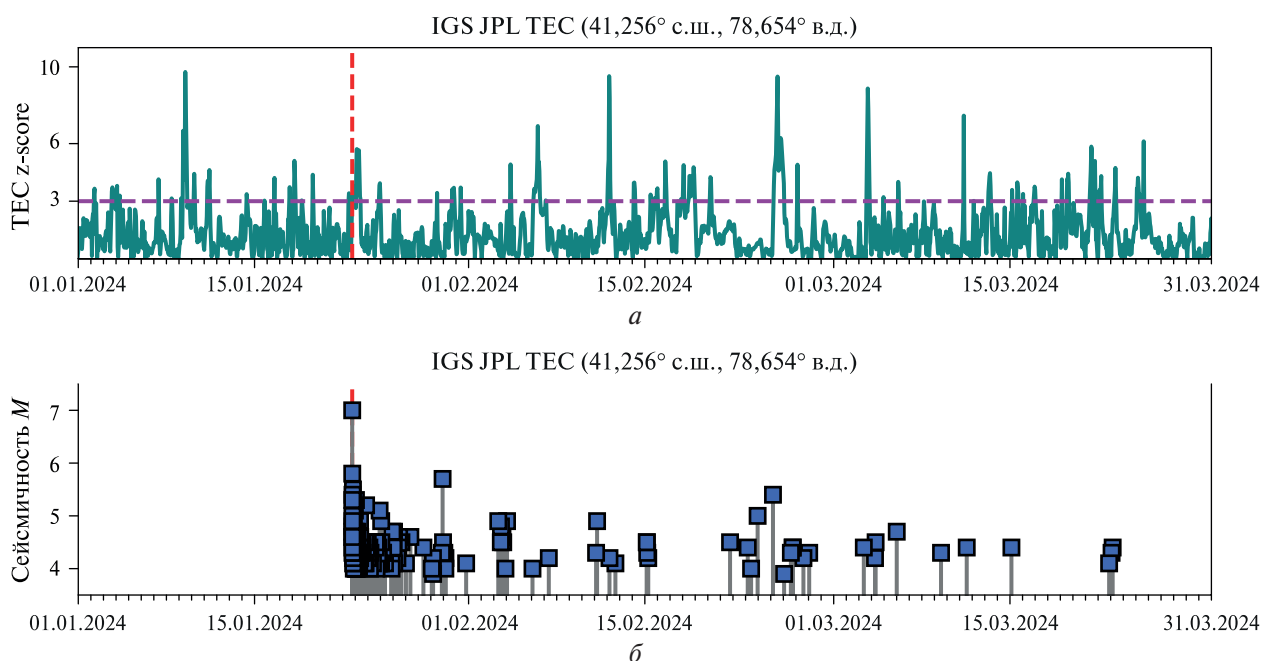


Рис. 6. Вариации z -оценки ПЭС над эпицентром главного толчка (а) и сейсмичность роя Учтурфанских землетрясений (б) за период 15.03.2024–31.03.2024. Горизонтальной линией указана граница выделения аномальных значений, равная трём (3σ). Вертикальной линией обозначен момент главного события 22.01.2024

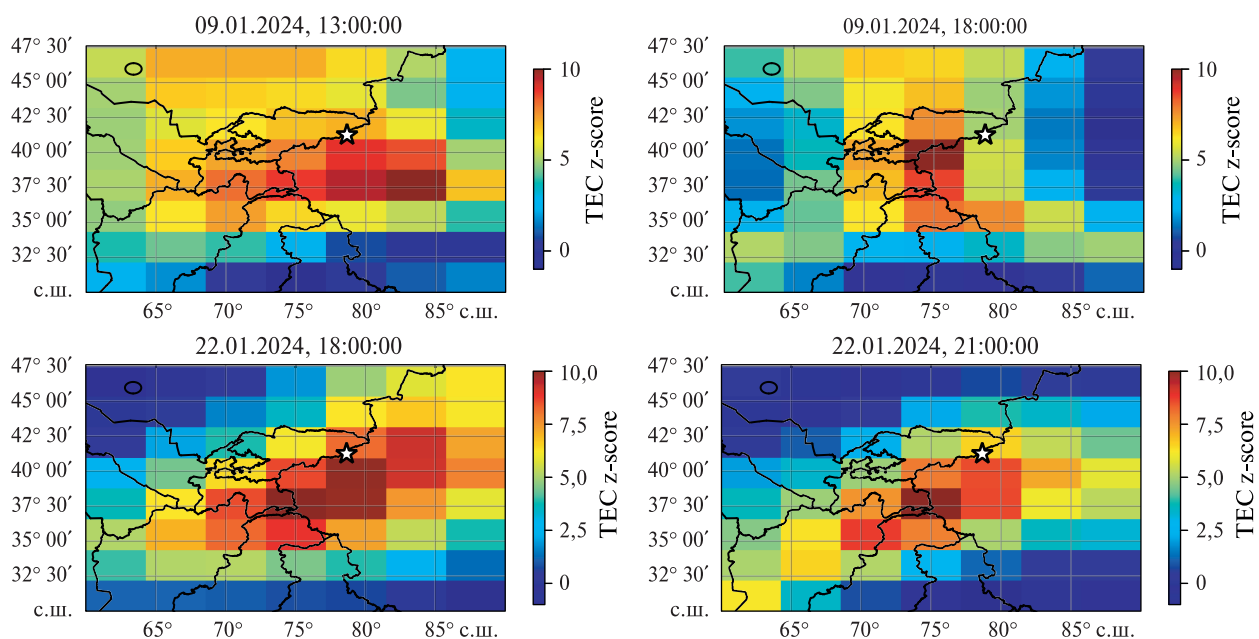


Рис. 7. Карты площадного распределения z -оценок ПЭС в моменты времени с аномально высокими значениями ПЭС над эпицентром

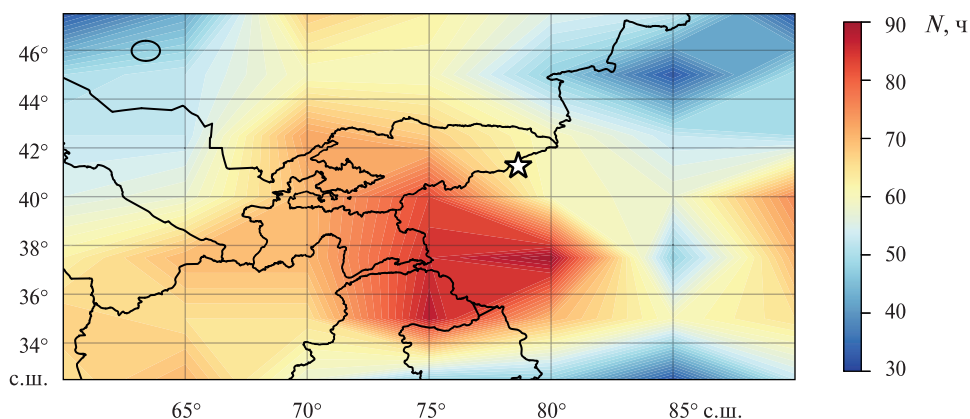


Рис. 8. Карта пространственного распределения количества наблюдений (в ч) ПЭС при которых наблюдались значения, превышающие 3σ

Заключение

В работе проведён анализ геолого-геофизических условий и аномалий полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере для Учтурфанского землетрясения (22.01.2024, 18:09 UTC). Эпицентр сейсмического события располагался в 50 км к западу от населённого пункта Учтурфан и был приурочен к зоне сочленения южной границы гор Тянь-Шаня и Таримской впадины. Важно отметить, что основная часть афтершоков сосредоточена вокруг эпицентра основного события и образует зону, вытянутую на 60 км в северо-восточном направлении и шириной около 25 км. За последние 10 лет сейсмическая активность этого района проявлялась в среднем в виде девяти землетрясений с $M \sim 4,6$ ежегодно. Это свидетельствует о присутствии здесь постоянного тектонического воздействия, которое можно связать с процессом Индо-Азиатской коллизии.

На текущий момент времени от семи сейсмологических агентств предоставлены довольно близкие решения фокальных механизмов для очага основного события Учтурфанского землетрясения 22.01.2024. При этом одна из нодальных плоскостей разрыва в очаге в среднем имеет простирание по азимуту 235° , северо-западное падение под углом 44° и направление смещения 46° от горизонта. Такие характеристики фокального механизма очага и положение гипоцентра Учтурфанского землетрясения максимально близки к геолого-геодезическим параметрам Майданского левостороннего взбросо-сдвига.

Для анализа вариаций ПЭС перед главным толчком были обработаны глобальные карты распределения ПЭС центра анализа данных JPL с использованием инструментов банка данных ИЗМИРАН. Анализ ПЭС над эпицентром главного события показал, что на фоне суточной периодичности с максимумами в интервале 05:00–09:00 UTC наблюдается рост значений ПЭС после 09.01.2024, который достигает экстремального значения после главного толчка 22.01.2024. Такие аномальные значения ПЭС не являются следствием магнитных бурь, о чём свидетельствуют незначительные вариации индекса экваториальной геомагнитной активности Dst за этот период (≥ -30 нТл). За аномальные были приняты те значения ПЭС, которые превышали трёхкратное среднеквадратичное отклонение за предыдущие семь дней. Для этого была использована z -оценка, которая показывает, насколько текущее значение ПЭС удалено от среднего значения в единицах стандартных отклонений. Карты площадного распределения z -оценок ПЭС перед главным толчком (09.01.2024) и после него (23.01.2024) показали наличие аномальных значений ($\sim 10\sigma$), локализованных в пространстве и во времени. При этом положение аномальной зоны после главного толчка имело вытянутую форму вдоль Майданского разлома и зоны афтершокового роя. Исходя из большого числа аналогичных работ можно сделать вывод, что наблюдаемые аномалии ПЭС перед Учтурфанским землетрясением 22.01.2024 связаны с подготовкой этого события и могут рассматриваться в качестве предвестников.

Авторы выражают благодарность сотрудникам центра анализа данных ионосферы JPL NASA и ИЗМИРАН, Центра World Data Center for Geomagnetism and Space Magnetism, службы USGS за предоставление свободного доступа к данным.

Проведённые исследования выполнены в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции Российской академии наук в Бишкеке (темы № 1021052806454-2-1.5.1 и 1021052806451-5-1.5.1).

Литература

1. *Абдыраева Б. С., Малдыбаева М. Б., Сабирова Г. А.* Механизм очага главного толчка землетрясения 22.01.2024 г. ($M_{PV} = 6.9$), Китай (КНР) // Вестн. Ин-та сейсмологии НАН КР. 2024. Т. 23. № 1. С. 8–14. DOI: 10.52179/1694-7290_2024_23.
2. *Вегенер А.* Происхождение континентов и океанов. Л.: Наука, 1984. 285 с.
3. Геологическая карта гор Тянь-Шаня Китая и прилегающих территорий М 1:1 000 000 / Гл. ред.: Ван Хунлян, Сюй Сюэйи. Пекин: Land Resources Press, 2007. (китайский язык).
4. Геологическая карта Кыргызской Республики М 1:500 000 / Гл. ред. Турсунгазиев Б. Т., Петров О. В. М.: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ, 2008.
5. *Губин И. Е.* Сейсмоструктура и сейсмораионирование: Тектоника Тянь-Шаня и Памира. М.: Наука, 1983. С. 9–24.
6. *Имашев С. А., Свердлик Л. Г.* Атмосферные и ионосферные аномалии, предшествующие сильному экваториальному землетрясению на Суматре // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 318–327. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-318-327.
7. *Свердлик Л. Г., Имашев С. А.* О предсейсмических аномалиях температуры атмосферы // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 1. С. 19–26. DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.019-026.
8. *Свердлик Л. Г., Имашев С. А.* Пространственно-временное распределение возмущений в атмосфере перед сильными землетрясениями в Тянь-Шане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 114–122. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-114-122.
9. *Соколова И. Н., Габсатарова И. П., Берёзина А. В. и др.* Сильное землетрясение 22 января 2024 г. с $M_w = 7.0$ на юге Тянь-Шаня // Российский сейсмол. журн. 2024. Т. 6. № 1. С. 42–64. DOI: 10.35540/2686-7907.2024.1.03.
10. *Тертышников А. В., Большаков В. О.* Технология мониторинга ионосферы с помощью приёмника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (Galileo) // Информация и космос. 2010. № 1. С. 100–105.
11. *Hernández-Pajares M., Juan J., Sanz J. et al.* The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998 // J. Geodesy. 2009. V. 83. Iss. 3–4. P. 263–275. DOI: 10.1007/s00190-008-0266-1.
12. *Kuzikov S. I.* The ratio of tectonic structure and modern movements of the crust in area of geodynamic proving ground in Bishkek // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 324. Article 012011. DOI: 10.1088/1755-1315/324/1/012011.
13. *Molnar P., Tapponnier P.* Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision // Science. 1975. V. 189. Iss. 4201. P. 419–426.
14. *Oikonomou C., Haralambous H., Pulinetis S. et al.* Investigation of pre-earthquake ionospheric and atmospheric disturbances for three large earthquakes in Mexico // Geosciences. 2021. V. 11. Iss. 1. Article 16. 28 p. DOI: 10.3390/geosciences11010016.
15. *Qiao X., Yu P., Nie Z. et al.* The Crustal Deformation Revealed by GPS and InSAR in the Northwest Corner of the Tarim Basin, Northwestern China // Pure and Applied Geophysics. 2017. V. 174. Iss. 3. P. 1405–1423. DOI: 10.1007/s00024-017-1473-6.
16. *Yao Y. B., Chen P., Wu H. et al.* Analysis of ionospheric anomalies before the 2011 $M_w = 9.0$ Japan earthquake // Chinese Science Bull. 2012. V. 57. P. 500–510. DOI: 10.1007/s11434-011-4851-y.
17. *Zhou Y., He J., Oimahmadov I. et al.* Present-day crustal motion around the Pamir Plateau from GPS measurements // Gondwana Research. 2016. V. 35. P. 144–54. DOI: 10.1016/j.gr.2016.03.011.

Anomalous variations in total electron content in the ionosphere and geodynamic conditions for the 7-magnitude Uchturpan earthquake of January 22, 2024

S. A. Imashev, S. I. Kuzikov

Research Station RAS in Bishkek, Bishkek 720049, Kyrgyzstan

E-mail: sanzhar.imashev@gmail.com

This study presents an analysis of geological-geophysical conditions and anomalous variations in the Total Electron Content (TEC) in the ionosphere for the Uchturpan earthquake (January 22, 2024, 18:09 UTC). The epicenter of the main seismic event was located 50 km west of the settlement of Uchturpan, near the junction of the southern boundary of the Tien-Shan Mountains and the Tarim Basin. One of the nodal planes of the fault in the hypocenter has an average strike at an azimuth of 235° , a northwest dip at an angle of 44° , and a slip direction of 46° from the horizontal. The focal mechanism characteristics and the hypocenter position of the main shock closely match the geological-geodetic parameters of the Maidan left-lateral thrust fault. The aftershock swarm forms a region about 25 km wide and stretches 60 km in a northeast direction. For the analysis of pre- and co-seismic TEC variations, global maps of TEC distribution from Jet Propulsion Laboratory data analysis center were processed. The TEC analysis over the epicenter of the main event showed an increase in values after January 9, 2024, reaching an extreme value after the main shock on January 22, 2024, against the background of diurnal periodicity with peaks in the interval of 05:00–09:00 UTC. Minor variations of the *Dst* index for January 2024 indicate that the observed anomalous TEC values are not a result of magnetic storms. Maps of the spatial distribution of TEC z -scores before the main event (January 9, 2024) and after it (January 23, 2024) showed the presence of anomalous variations, localized in space and time. The position of the anomalous zone after the main event had an elongated shape along the Maidan fault and the aftershock swarm zone.

Keywords: earthquake, Uchturpan, total electron content, anomalies, Maidan fault

Accepted: 04.07.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-87-98

References

1. Abdyaeva B., Maldybaeva M., Sabirova G., The focal mechanism of the main shock of the earthquake on January 22, 2024 ($M_{pV} = 6.9$), China, *Vestnik Instituta Seysmologii NAN KR*, 2024, No. 1(23), pp. 8–14 (in Russian), DOI: 10.52179/1694-7290_2024_23.
2. Wegener A., *Proiskhozhdenie kontinentov i okeanov* (The origin of continents and oceans), Leningrad: Nauka, 1984, 285 p.
3. *Geological map of the Tien Shan Mountains of China and adjacent areas M 1:1,000,000*, Van Khunlyan, Syuy Syueyi (Eds.), Beijing: Land Resources Press, 2007 (in Chinese).
4. *Geologicheskaya karta Kyrgyzskoy Respubliki M 1:500 000* (Geological map of the Kyrgyz Republic M 1:500,000), Tursungaziev B. T., Petrov O. V. (Eds.), Moscow: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2008 (in Russian).
5. Gubin I. E., *Seismotektonika i seismoraionirovanie, Tektonika Tyan'-Shanya i Pamira* (Seismotectonics and seismic zoning: Tectonics of Tien Shan and Pamir), Moscow: Nauka, 1983, pp. 9–24 (in Russian).
6. Imashev S. A., Sverdlik L. G., Atmospheric and ionospheric anomalies preceding a strong equatorial earthquake in Sumatra, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 318–327 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-318-327.
7. Sverdlik L. G., Imashev S. A., On preseismic anomalies of atmosphere temperature, *Geosistemy perekhodnykh zon*, 2019, Vol. 3, No. 1, pp. 19–26 (in Russian), DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.019-026.
8. Sverdlik L. G., Imashev S. A., Spatial-temporal distribution of atmospheric perturbations before strong earthquakes in Tien-Shan, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 114–122 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-114-122.
9. Sokolova I. N., Gabsatarova I. P., Beryozina A. V. et al., Large earthquake on January 22, 2024 with $M_w = 7.0$ in the south of Tien Shan, *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*, Vol. 6, No. 1, pp. 42–64 (in Russian), DOI: 10.35540/2686-7907.2024.1.03.

10. Tertyshnikov A., Bolshakov V., Ionosphere monitoring technology using the signal receiver of navigation SV GPS/GLONASS (Galileo), *Information and Space*, 2010, No. 1, pp. 100–105 (in Russian).
11. Hernández-Pajares M., Juan J., Sanz J. et al., The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998, *J. Geodesy*, 2009, Vol. 83, Issue 3–4, pp. 263–275, DOI: 10.1007/s00190-008-0266-1.
12. Kuzikov S. I., The ratio of tectonic structure and modern movements of the crust in area of geodynamic proving ground in Bishkek, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 324, Article 012011, DOI: 10.1088/1755-1315/324/1/012011.
13. Molnar P. Tapponnier P., Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision, *Science*, 1975, Vol. 189, Issue 4201, pp. 419–426.
14. Oikonomou C., Haralambous H., Pulinetis S. et al., Investigation of pre-earthquake ionospheric and atmospheric disturbances for three large earthquakes in Mexico, *Geosciences*, 2021, Vol. 11, Issue 1, Article 16, 28 p., DOI: 10.3390/geosciences11010016.
15. Qiao X., Yu P., Nie Z. et al., The Crustal Deformation Revealed by GPS and InSAR in the Northwest Corner of the Tarim Basin, Northwestern China, *Pure and Applied Geophysics*, 2017, Vol. 174, Iss. 3, pp. 1405–1423, DOI: 10.1007/s00024-017-1473-6.
16. Yao Y. B., Chen P., Wu H. et al., Analysis of ionospheric anomalies before the 2011 $M_w = 9.0$ Japan earthquake, *Chinese Science Bull.*, 2012, Vol. 57, pp. 500–510, DOI: 10.1007/s11434-011-4851-y.
17. Zhou Y., He J., Oimahmadov I. et al., Present-day crustal motion around the Pamir Plateau from GPS measurements, *Gondwana Research*, 2016, Vol. 35, pp. 144–54, DOI: 10.1016/j.jgr.2016.03.011.