

УДК 528::629.783+551.24

Прохоров О.А., Кузиков С.И.
Научная станция Российской академии наук (НС РАН),
г. Бишкек, Кыргызстан

АНАЛИЗ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ГНСС-ИЗМЕРЕНИЙ В РАЙОНЕ УЧТУРФАНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 22.01.2024

Аннотация. На основе авторского алгоритма рассчитаны временные ряды (январь 2024 г.) полного электронного содержания в ионосфере (ПЭС) по данным ГНСС-станций в районе сильного Учтурфанского землетрясения 22.01.2024 г. Полученные значения ПЭС хорошо согласуются с данными ведущих мировых агентств (JPL и AIRI) при незначительном расхождении сравниваемых значений ($\leq 5 \text{ TECu}$). Авторский метод способен обеспечить минутную дискретность и более детальный площадной охват данными ПЭС для исследования ионосферных процессов. В результате применения к рассчитанному временному ряду ПЭС алгоритмов MAD-Z и Isolation Forest выделены аномальные состояния ионосферы с превышением на 30-40 % фонового уровня при отсутствии магнитных бурь. Первый временной интервал аномалий 11-18 января 2024 г. предшествует Учтурфанскому землетрясению и характеризуется повышенными и пониженными значениями ПЭС. Второй аномальный период с максимально повышенным уровнем ПЭС совпадает со временем основного толчка и последующих афтершоков.

Ключевые слова: ГНСС, полное электронное содержание, аномалии, землетрясение.

22.01.2024-ЖЫЛЫНЫН УЧТУРФАН ЖЕР ТИТИРӨӨСҮНҮН АЙМАГЫНДА ГНСС-ӨЛЧӨӨЛӨРҮНҮН НЕГИЗИНДЕ ИОНОСФЕРАНЫН ТОЛУК ЭЛЕКТРОНДУК МАЗМУНУН ТАЛДОО

Кыскача мазмуну. Автордук алгоритмдин негизинде 2024-жылдын 22-январында болгон күчтүү Учтурфан жер титирөөсүнүн аймагындагы ГНСС-станцияларынын маалыматтары боюнча, 2024-жылдын январ айы үчүн ионосферадагы толук электрондук мазмунунун (ТЭМ) убакыт катарлары эсептелген. Алынган ТЭМ маанилери дүйнөдөгү ири агенттиктердин (JPL жана AIRI) маалыматтары менен жакшы дал келет, ал эми салыштырылган маанилердин ортосундагы айырмачылык азыраак ($\leq 5 \text{ TECu}$). Автордук ыкчам ТЕС маалыматтары менен ионосфералык процесстерди изилдөө үчүн минуталык дискреттүүлүктү жана жагымдуу аянттык камтууну камсыз кыла алат. Эсептелген ТЭМ убакыт катарларына MAD-Z жана Isolation Forest алгоритмдерин колдонуунун натыйжасында, магниттик бороондор болбогондо, фондук деңгээли 30-40% ашкан ионосферанын аномалдуу абалдары бөлүнүп көрсөтүлгөн. Аномалиялардын биринчи убакыт аралыгы 11-18-январь Учтурфан жер титирөөсүнө чейинки мезгилге туура келип, жогору жана төмөнкү ТЭМ маанилери менен мүнөздөлөт. Экинчи аномалдуу мезгил, башкача айтканда ТЭМ деңгээли максималдуу көтөрүлгөн учур, негизги жер титирөө толкунунун жана кийинки афтершоктордун (кийки толкундардын) убагына туура келет.

Негизги сөздөр: ГНСС, толук электрондук мазмун, аномалиялар, жер титирөө.

ANALYSIS OF THE TOTAL ELECTRON CONTENT OF THE IONOSPHERE BASED ON GNSS MEASUREMENTS IN THE REGION OF THE UCHTURFAN EARTHQUAKE ON JANUARY 22, 2024

Abstract. Using the author's algorithm, time series (January 2024) of the ionospheric total electron content (TEC) were calculated based on data from GNSS stations in the area of the strong

Uchurfan earthquake of January 22, 2024. The obtained TEC values are in good agreement with data from leading global agencies (JPL and AIRI), with a slight discrepancy between the compared values (≤ 5 TECu). The author's method is capable of providing minute-by-minute resolution and more detailed areal coverage of TEC data for studying ionospheric processes. By applying the MAD-Z and Isolation Forest algorithms to the calculated TEC time series, anomalous ionospheric states were identified with an excess of 30-40% above the background level in the absence of magnetic storms. The first time interval of anomalies, January 11-18, preceded the Uchurfan earthquake and was characterized by elevated and depressed TEC values. The second anomalous period with the highest TEC level coincides with the time of the main shock and subsequent aftershocks.

Keywords: GNSS, Total Electron Content, anomalies, earthquake.

Введение. Развитие космических технологий позволило с большей пространственной детальностью и с более частой дискретностью проводить исследование атмосферы со спутников. При этом значительная доля внимания уделяется ионосфере – активному слою, который защищает планету от солнечного воздействия, влияет на радиосвязь и постоянно взаимодействует с другими оболочками Земли [1]. В конце 20 века интенсивно развивались Глобальные Навигационные Спутниковые Системы (ГНСС), на которые в настоящее время завязано большое количество привычных функций в гражданской и военной электронике. Сейчас доминируют следующие ГНСС: GPS (Global Positioning System, США), ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система, Россия), Galileo (Европейский союз) и китайская Beidou (<https://glonass-iac.ru/guide/gnss/>). Такие космические группировки могут обеспечить высокоточное позиционирование в различных точках земного шара.

Анализ погрешностей ГНСС-измерений выявил, что наибольший вклад в ошибку вносит ионосферная задержка, величина которой прямо пропорциональна Полному Электронному Содержанию (ПЭС, TEC – Total Electronic Content) вдоль трассы распространения сигнала [2]. Такой подход и расчёты могут обеспечить непрерывный, широкомасштабный и достаточно точный мониторинг состояния ионосферы [3]. Таким образом, ПЭС отражает суммарное количество свободных электронов, находящихся в вертикальном столбе ионосферы с площадью поперечного сечения 1 см^2 или 1 м^2 . В качестве единицы измерения используется 1 TECu, что эквивалентно 10^{12} электронов/ см^{-2} или 10^{16} электронов/ м^{-2} . Уровень параметра ПЭС характеризует интегральные свойства ионосферы и оказывает заметное влияние на прохождение радиосигналов [4, 5].

Исследования показывают, что изменения значений ПЭС наблюдаются как при воздействии естественных факторов (солнечные вспышки, затмения, геомагнитные возмущения, землетрясения), так и вследствие техногенных процессов, например, запусков ракет или мощных взрывов [6]. В нашем случае интерес представляет вопрос влияния литосферных процессов на ионосферные возмущения, и возможность по уровню ПЭС судить о сейсмической активности исследуемых районов [7].

Сигналы навигационных спутников, принимаемые ГНСС-приемниками, содержат данные, достаточные для вычисления ПЭС в точках пересечения линии визирования спутник–приёмник с ионосферой. Такие точки, называемые «проколами», обычно расположены на высоте около 350-450 км над Землёй. Различные международные исследовательские центры используют собственные алгоритмы для построения глобальных карт ПЭС (GIM) [8, 9] по данным станций сети IGS (<https://igs.org/network-resources>).

Эти карты формируются для всего земного шара с пространственным шагом 5° по долготе и 2.5° по широте, периодичность представления данных в этих точках чаще всего составляет от 30 до 120 минут, с посуточным размещением данных в одном файле. Помимо глобальных моделей, существуют специализированные программы, позволяющие выполнять расчёт ПЭС для отдельных локальных территорий или усреднённых значений

над конкретной станцией. Такие вычисления обычно выполняются с шагом в 30 секунд, что обеспечивает более детализированное описание динамики ионосферы. Так же глобальные продукты ПЭС имеют сглаженный характер, так как основаны на интерполяции данных разреженной сети станций. Доступные программные комплексы для локальных расчётов нередко ограничены форматом входных файлов или выбором нужных параметров для конкретных задач.

Весомым основанием для узконаправленного анализа вариаций ПЭС послужило сильное ($M=6.9$) Учтурфанское землетрясение 22 января 2024 года (18:09 UTC) на территории Китая, в непосредственной близости к границе Кыргызстана. Достаточно ощутимые колебания земной поверхности основного толчка и афтершоков были зафиксированы за сотни километров от эпицентральной части (41.256° с.ш., 78.654° в.д.). В этой связи уже был проделан анализ аномальных вариаций ПЭС для этого события на основе глобальных карт GIM [7]. В этой работе приводятся авторские расчёты ПЭС над областью Учтурфанского землетрясения и исследуются локальные вариации ПЭС на основе данных ГНСС-измерений, проводимых сотрудниками ИС РАН.

Методика обработки данных. Источником ГНСС-данных для наших исследований послужили 4 станции ИС РАН с непрерывным режимом измерения, и расположенные как можно ближе к эпицентру Учтурфанского землетрясения 22.01.2024 г. на территории Кыргызстана (рисунок 1).

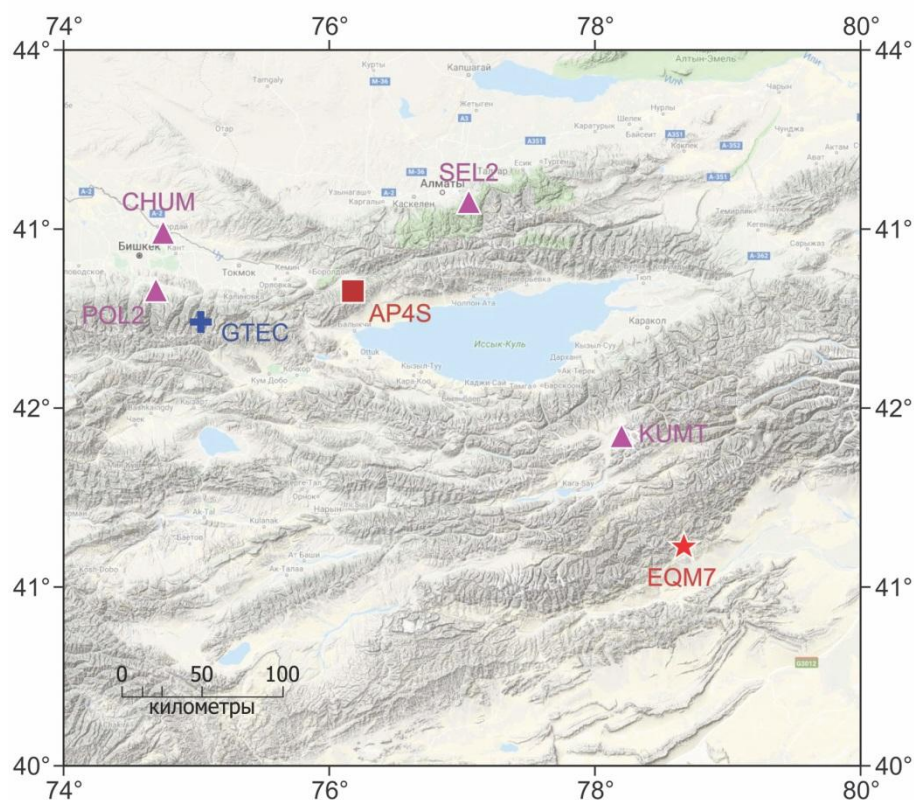


Рисунок 1. Положение 4-х ГНСС-станций ИС РАН (KUMT, SEL2, POL2, CHUM) относительно эпицентра Учтурфанского землетрясения 22.01.2024 г. EQM7 – эпицентр, AP4S – средняя позиция для 4-х ГНСС-станций, GTEC – ближайшая точка к AP4S по данным Глобальных карт ПЭС (GIM).

В соответствии с рисунком 1 ГНСС-станции разнесены друг от друга на 36 - 310 км. Расстояния от этих станций до эпицентра землетрясения (EQM7) варьируют в пределах 77-376 км. Для сравнения стоит отметить, что средняя позиция для этих станций (AP4S)

удалена от эпицентра на 259 км, а ближайшая точка (GTEC) с данными ПЭС от глобальных карт GIM – на 333 км.

Для повышения точности локальных определений ПЭС сотрудниками лаборатории GPS в ИС РАН был создан авторский алгоритм расчёта ПЭС [10], основанный на обработке данных от станции по каждому GPS-спутнику и каждой эпохе (моменту) регистрации сигналов с дискретностью записи ≥ 30 секунд. Далее в работе под величиной ПЭС мы понимаем его скорректированное вертикальное значение в точке прокола ионосферы, поскольку чаще всего сферическая ионная толща пересекается лучом радиосигнала от спутника не под прямым углом атаки, а – под наклоном к поверхности. Так над станцией на каждую эпоху рассчитываются значения ПЭС от видимых на этот момент спутников. Разброс позиций таких проколов ионосферы может составлять первые градусы по долготе и широте, в зависимости от установленных ограничений алгоритма и пространственного положения спутников. Далее по выбранному варианту методики (среднее арифметическое, взвешенное по дистанции или др.) рассчитывается значение ПЭС (из 30-35 величин) над исследуемой станцией на эпоху измерения. В нашем случае вполне достаточно использовать данные по ПЭС с временным шагом в 1 минуту в течение января 2024 года над каждой из 4-х станций.

Результаты расчёта ПЭС и сравнение с глобальными данными. Таким образом, над каждой исследуемой нами станцией с дискретностью 60 сек получено 1440 значений ПЭС в сутки, что составляет 44640 величин за весь январь (рисунок 2).

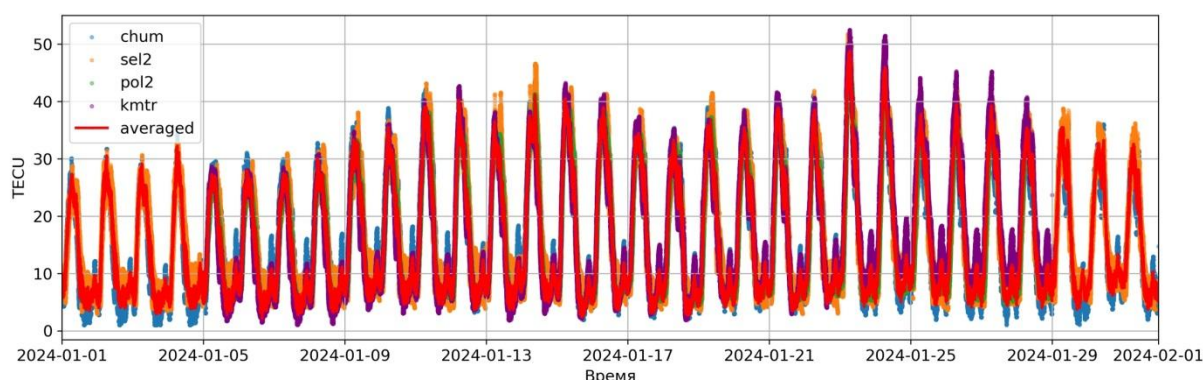


Рисунок 2. Вариации значений ПЭС над 4-мя станциями (chum, sel2, pol2, kmtr) и среднее значение параметра по всем станциям (averaged) в январе 2024 г. с шагом 1 минуту.

Из представленных на рисунке 2 совмещенных графиков ПЭС для 4-х ГНСС-станций следует, что самыми значимыми являются регулярные суточные вариации возбужденного состояния ионосферы. В январские дни 2024 г. солнечное излучение в полдень местного времени увеличивало ионизацию атмосферы до $\sim 30-50$ TECU, и, соответственно, в ночное время уровень ПЭС падал до $\sim 1-5$ TECU. Кроме этого, очевидны вариации суточных экстремумов (особенно максимумов ПЭС) в течение январских дней, которые могут быть связаны с Учтурфанским сильным землетрясением 22.01.2024 г.

Из вариаций ПЭС над отдельными станциями (рисунок 2) видны расхождения до 5-7 TECU на каждую рассматриваемую эпоху наблюдений, но в общий тренд изменения значений ПЭС для всех станций сохраняется. Поэтому для упрощения процедур сравнения и увеличения статистической надежности данных из ~ 180 тысяч значений ПЭС для 4-х станций получаем одну среднюю кривую этого параметра (averaged (рисунок 2)).

Чтобы проверить корректность авторских расчетов ПЭС на основе локальных ГНСС-данных обратимся к данным глобальных карт GIM, которые формируются ведущими агентствами JPL (Jet Propulsion Laboratory, Калифорнийский технологический

институт, США) и AIRI (Aerospace Information Research Institute, Китай). Учитывая тот факт, что данные о ПЭС от этих агентств доступны только с часовой дискретностью значений, то нами была выполнена процедура усреднения минутных значений до часовых ПЭС. В результате таких преобразований для сопоставления можно представить совмещенные графики по разным методам расчёта ПЭС (JPL, AIRI и авторский – LGPS) в районе Учтурфанского землетрясения 22.01.2024 г. (рисунок 3).

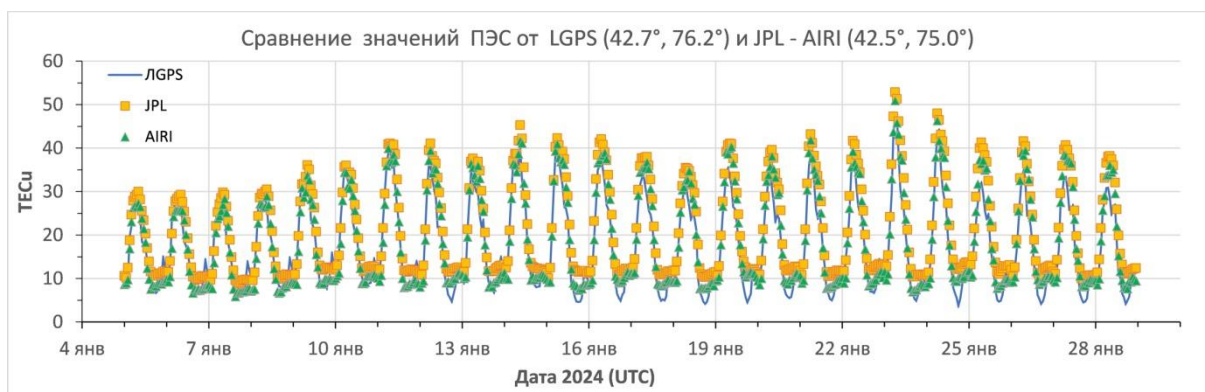


Рисунок 3. Сопоставление графиков ПЭС (дискретность 1 час) при разных методах расчёта (JPL, AIRI и авторский – LGPS).

На рисунке 3 отмечается визуально некоторое расхождение в экстремальных суточных значениях ПЭС между всеми тремя методами расчёта JPL, AIRI и LGPS. Однако и отмечается общая согласованность вариаций ПЭС по всем трём видам графиков. Более детальное и обоснованное численное сравнение величин ПЭС из трех источников можно представить в виде таблицы 1.

Таблица 1 - Статистические параметры и отклонения ПЭС для разных методов расчёта.

Параметры ПЭС (TECu)	LGPS	JPL	AIRI	LGPS - JPL	LGPS - AIRI	JPL - AIRI
Минимум	3.7	8.8	5.8	-5.1	-2.1	3.0
Среднее	17.3	21.0	18.5	-3.7	-1.2	2.5
Максимум	47.9	52.9	50.9	-5.0	-3.0	2.0
Интервал вариации	44.2	44.1	45.1	0.1	-0.9	-1.0
Стандартное отклонение	10.0	11.0	11.2	-1.0	-1.2	-0.2
Объем выборки	576	576	576	576	576	576

Содержание таблицы 1 также не свидетельствует о критических расхождениях значений ПЭС при методах их расчёта. Самые значимые здесь отклонения по экстремальным величинам ПЭС ~5 TECu между алгоритмами LGPS-JPL, но при этом другие пары LGPS-AIRI и JPL-AIRI отклоняются друг от друга на одном уровне 2-3 TECu. Отклонения средних значений минимально для пары LGPS-AIRI с дельтой в 1.2 TECu, тогда как для пары JPL-AIRI это значение 2.5 TECu. А интервалы вариаций для всех трёх методов вообще отклоняются менее чем 1 TECu, что свидетельствует о систематическом схождении величин ПЭС по всем трём методам. Заметим, что указанные нами расхождения находятся в ожидаемых пределах для разных методов расчёта ПЭС и могут быть обусловлены: различными алгоритмами устранения межчастотных смещений, отличиями в моделях высоты ионосферы, разной пространственной разрешающей способностью методов, особенностями интерполяции при построении локальных и глобальных карт.

Таким образом, можно утверждать, что качество расчёта ПЭС для алгоритма LGPS/находится на должном уровне.

Анализ вариаций ПЭС относительно Учтурфанского землетрясения. Кроме вышеизложенных задач по расчёту ПЭС на основе ГНСС-данных, естественным образом, возникает вопрос о возможности таким образом наблюдать за состоянием ионосферы и оперативно выявлять аномальные отклонения этого параметра. Поэтому для данных ПЭС по алгоритму LGPS были применены два современных метода с целью выделения аномалий во временном ряду этого параметра. Один из таких методов – MAD-Z (Median Absolute Deviation Z-score), робастный статистический алгоритм для идентификации выбросов в данных [11]. В отличие от классического Z-показателя на основе среднего арифметического и стандартного отклонения, в алгоритме MAD-Z используется медиана и медианное абсолютное отклонение (MAD). Это делает алгоритм более устойчивым к влиянию аномалий на пороговое значение с использованием выражения (1).

$$Z_{mad} = \frac{0.6745 \times (x_i - median(X))}{MAD} \quad (1)$$

В (1) x_i – текущее значение параметра, MAD – медианное абсолютное отклонение, 0.6745 – константа масштабирования, обеспечивающая согласованность с параметрами нормального распределения. Если значения исследуемого параметра превышают величину $3 \times Z_{mad}$, то их можно классифицировать как аномальные. На рисунке 4 показан результат применения такого алгоритма, где ряд максимальных суточных значений ПЭС попал в разряд аномальных выбросов.

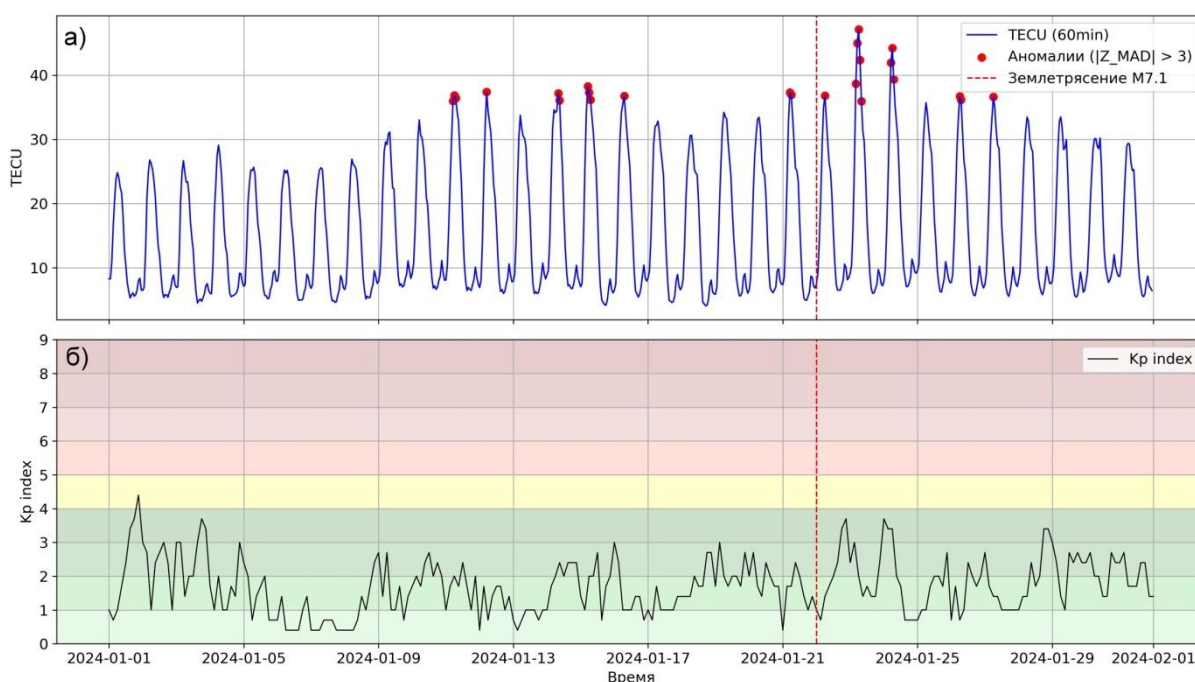


Рисунок 4. а) Аномальные значения ПЭС по алгоритму Zmad. б) Вариации глобального индекса геомагнитной активности Земли. Вертикальный красный пунктир – время Учтурфанского землетрясения.

Для исключения аномалий, связанных с мощными возмущениями магнитосферы Земли, на рисунке 4 (б) приведён индекс экваториальной геомагнитной активности Кр по данным международной службы геомагнитных индексов ISGI

(https://isgi.unistra.fr/data_download.php). Весь январь 2024 года этот индекс находился в зелёной зоне и показывает, что околоземное пространство не было подвержено значимым магнитным бурям, которые могли повлиять на выделенные нами аномалии ПЭС. По методу Zmad на рисунке 4 (а) выделяются аномальные повышенные значения ПЭС на временном интервале 11-16 января, который предшествовал основному сейсмическому событию 22.01.2024 г. Далее с 21 по 27 января 2024 г. снова проявился аномальный всплеск активности ионосферы, при этом этот процесс начался за один день до главного толчка землетрясения и максимально сильно проявился 23-24 января 2024 г. во время интенсивной череды афтершоков.

Второй алгоритм Isolation Forest основан на методах машинного обучения и на концепции изоляции аномалий [12]. В отличие от других методов с построением профиля «нормального» поведения, этот алгоритм целенаправленно ищет такие значения параметра, которые легко отделить от основной массы данных. Аномалии представляются здесь редкими и отличающимися значениями исследуемого параметра, и они требуют меньшее количество случайных разбиений признакового пространства для их изоляции.

При этом создается множество «деревьев изоляции» (Isolation Trees), которые рекурсивно разбиваются случайным выбором признака и порогового значения. Средняя глубина пути для изоляции значения становится его «аномальным score». Чем меньше средняя глубина пути или чем быстрее значение было изолировано, тем выше вероятность возведения его в ранг аномалии (рисунк 5).

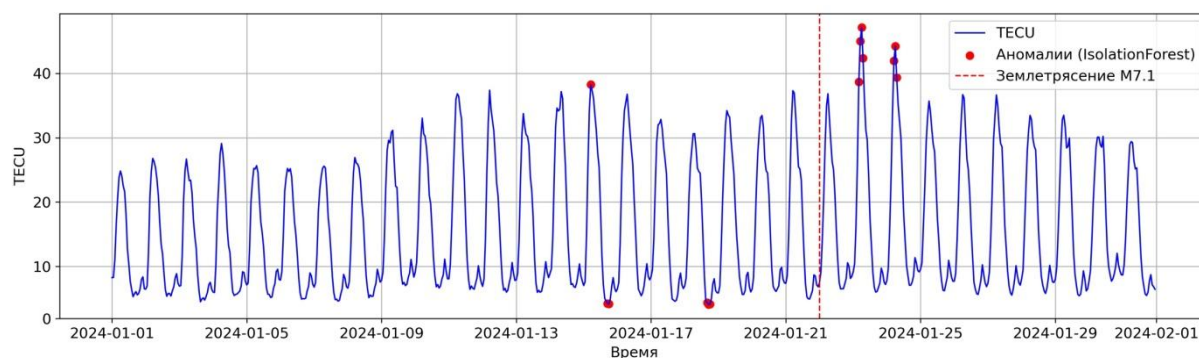


Рисунок 5. Аномальные значения ПЭС по алгоритму Isolation Forest. Вертикальный красный пунктир – время Учтурфанского землетрясения.

Из рисунка 5 следует, что метод выделения аномалий Isolation Forest более требователен к вариационным перепадам исследуемого параметра, т.к. здесь выделено меньшее количество аномальных точек. В этом случае можно выделить интервал 15-18 января 2024 г. (до Учтурфанского события), где выделяются не только повышенные уровни ПЭС, но аномально низкие значения концентрации заряженных частиц в ионосфере. И далее по этому алгоритму также выделены 23-24 января 2024 г. с аномальным уровнем ПЭС.

Использование двух взаимодополняющих методов, статистического MAD-Z и основанного на машинном обучении Isolation Forest, позволило повысить надежность определения аномалий во временном ряду ПЭС. При этом минимизируется количество случаев выделения ложных аномалий и пропуска реальных возмущений ионосферы.

Заключение. Авторский алгоритм (LGPS) для расчёта полного электронного содержания в ионосфере продемонстрировал достаточно высокий уровень согласованности с данными ведущих мировых агентств (JPL и AIRI) построения глобальных карт ПЭС (TEC) на основе GNSS-данных. Количественное сравнение статистических параметров для разных наборов ПЭС показывает соизмеримое и допустимое расхождение значений

(≤ 5 TECu), что свидетельствует о хорошей воспроизводимости рассчитанных данных. Однако авторский метод способен обеспечить более высокую временную дискретность (минутные данные против часовых), что открывает возможность для исследования кратковременных ионосферных процессов. Кроме этого, алгоритм LGPS позволяет обеспечить и более детальную площадную дискретность распределения значений ПЭС с опорой не только на места расположения ГНСС-станций, но и на отдельные точки прокола ионосферы радиолучом от спутника.

В результате применения к рассчитанному временному ряду ПЭС известных алгоритмов MAD-Z и Isolation Forest позволило выделить аномальные состояния ионосферы с превышением на 30-40 % фонового уровня. Первый временной интервал аномалий 11-18 января 2024 года предшествует Учтурфанскому землетрясению и характеризуется не только повышенными значениями ПЭС, но и эпохами с крайне низкой активностью ионосферы. Второй аномальный период в вариациях ПЭС выделяется 21-27 января 2024 г., что совпадает со временем основного толчка и последующих афтершоков. При отсутствии других видимых причин (магнитные бури) для аномальных вариаций ПЭС в это время, есть основания предполагать о влиянии на ионосферу процессов в земной коре по предсейсмической подготовке и реализации Учтурфанского землетрясения и его афтершоков. В качестве дополнительного повторяющегося признака (краткосрочного предвестника) может выступать снижение уровня ПЭС (отсутствие аномальных уровней) перед главным толчком землетрясений [13]. Такие данные подтверждают перспективность использования мониторинга ПЭС в комплексе методов прогнозирования сейсмической опасности [14]. Так мониторинг ПЭС на основе данных ГНСС-наблюдений позволяет отслеживать фоновое состояние ионосферы и выявлять значимые отклонения уровня её ионизации, которые могут быть вызваны солнечной активностью, сейсмотектоническими процессами и мощными взрывами.

Перспективы дальнейшего развития данной методики локального исследования уровня ПЭС может включать в себя автоматизацию процесса выделения и классификацию типов аномалий как по отдельным станциям, так и их комплексу. Также есть возможность объединения доступных ГНСС-данных на территории Кыргызстана для построения детальных региональных карт ПЭС и отслеживания пространственно-временной динамики вариаций этого параметра. Кроме того, есть необходимость совершенствования алгоритмов прогнозирования состояния ионосферы на основе выявленных закономерностей в Центрально-Азиатском регионе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. – М.: Наука. – 1988. – 528 с.
2. Гаврилов Н.М. Измерение характеристик атмосферы методом наземного радиоприема навигационных спутниковых систем. – СПб.: СПбГУ. – 2007. – 31 с.
3. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН. – 2006. – 480 с.
4. Calais E., Minster J.B. GPS detection of an ionospheric perturbation following the January 17, 1994, Northridge earthquake // *Geoph. Res. Lett.* – 1995. – Vol. 22. – P. 1045-1048.
5. Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Razinkov O.G., Tereshchenko E.D. Phase and phase-difference ionospheric radiotomography // *International Journal of Imaging Systems and Technology.* – 1994. – Vol. 5. – Iss. 2. – P. 128-140.
6. Костин В.М., Беляев Г.Г. Мониторинг параметров плазмы верхней ионосферы для выявления мощных естественных и техногенных источников воздействия на атмосферу из опыта работы спутника Космос-1809 // *Материалы 19-й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса"*. – М.: ИКИ РАН, 2021. – С. 412+18. DOI:10.221046/19DZZconf-2021a.

7. Имашев С.А., Кузиков С.И. Аномальные вариации полного электронного содержания ионосферы и геодинамические условия для Учтурфанского землетрясения 22.01.2024 магнитудой 7 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21. – № 4. – С. 87–98. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-87-98.
8. Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere // Proc. IGS AC Workshop, February 9–11 1998. Darmstadt, Germany. – 1998. – P. 307–320.
9. Otsuka Y., Suzuki K., Nakagawa S., Nishioka M., Shiokawa K., Tsugaw T. GPS Observations of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances over Europe // Annales Geophysicae. – 2013. – Vol. 31. – P. 163–172. DOI: 10.5194/angeo-31-163-2013.
10. Прохоров О.А. Методика расчета полного электронного содержания ионосферы на основе космогеодезических данных и дифференциальных кодовых задержек спутников // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Сб. материалов XVI Междунар. конф. молодых ученых и студентов. – Бишкек: НС РАН, 2023. – С. 212–218.
11. Kappal S. Data Normalization Using Median & Median Absolute Deviation (MMAD) based Z-Score for Robust Predictions vs. Min-Max Normalization. – Data Dojo, GH 5&7/775, Paschim Vihar, New Delhi, 2019. DOI:10.13140/RG.2.2.32799.82088.
12. Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z.-H. Isolation Forest // Proceedings of the Eighth IEEE International Conference on Data Mining (ICDM), 2008. DOI: 10.1109/ICDM.2008.17.
13. Pulinet S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric Precursors of Earthquakes. – Berlin: Springer, 2004. – 315 p. DOI: 10.1007/b137616.
14. Shah M., Jin S. Statistical characteristics of seismo-ionospheric GPS TEC disturbances prior to global $M_w \geq 5.0$ earthquakes (1998–2014) // Journal of Geodynamics. – 2015. – Vol. 92. – P. 42–49. DOI: 10.1016/j.jog.2015.10.002.

Рецензент: к.ф.-м.н. Имашев С.А.