Исследование вариаций полного электронного содержания ионосферы над Тянь-Шанем

С. И. Кузиков, С. А. Имашев

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

Актуальность исследования вариаций полного электронного содержания ионосферы (ПЭС) обусловлена необходимостью выделения аномалий, связанных с природными и техногенными процессами, на фоне регулярных гелио- и геофизических циклов. В работе выявлены закономерности и особенности вариаций ПЭС за 2000–2023 гг. над территорией Западного и Центрального Тянь-Шаня для создания основы идентификации возмущений, в том числе литосферного происхождения. По глобальным ионосферным картам Лаборатории реактивного движения JPL (*англ.* Jet Propulsion Laboratory) с разрешением 2,5×5° и часовым интервалом показана пространственная однородность ПЭС (отклонения ⩽2 TECu) для территории исследования, что позволяет опираться на данные репрезентативной точки 42,5° с. ш., 75° в. д. На основе непрерывного вейвлет-преобразования подтверждено доминирование 11-летнего цикла солнечной активности, выявлены годовая, полугодовая и 27-дневная периодичности в изменениях ПЭС. Для Тянь-Шаня в годы высокой солнечной активности дневные максимумы ПЭС варьируют в пределах 25–70 TECu, а ночные минимумы — 8–20 TECu. В годы низкой солнечной активности эти показатели снижаются до 9–18 и 5–8 TECu соответственно. Сезонные максимумы ПЭС приходятся на весну и осень с запаздыванием до месяца относительно равноденствий. Для суточного хода ПЭС статистический максимум наступает в 07:00 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time), минимум — в 22:00–24:00 UTC. Показана чувствительность ПЭС к геомагнитным бурям и сильным землетрясениям. Впервые получены региональные фоновые характеристики ионосферы над Тянь-Шанем, необходимые для достоверного выделения аномалий различной природы.

Ключевые слова: Тянь-Шань, ионосфера, ГНСС, полное электронное содержание, ПЭС, солнечная и геомагнитная активность, литосферно-ионосферные связи

Одобрена к печати: 07.08.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-415-426

Введение

Ионосфера считается динамически активным компонентом системы геосфер и находится с ними в постоянном взаимодействии посредством различного вида физических полей (Брюнелли, Намгаладзе, 1988). Она служит защитным куполом Земли от космического воздействия и значительно влияет на распространение радиосигналов. Развитие глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) обеспечило возможность непрерывного мониторинга ионосферы на обширных территориях (https://glonass-iac.ru/guide/gnss/). При этом ионосферная задержка навигационного сигнала пропорциональна полному электронному содержанию ПЭС (*англ.* Total Electron Content — TEC) вдоль траектории радиолуча. По ГНСС-данным можно проводить мониторинг ионосферных неоднородностей с широким охватом территорий и детальным пространственно-временным разрешением (Афраймович, Перевалова, 2006; Гаврилов, 2007; Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

На основе наблюдений ГНСС рассчитываются глобальные ионосферные карты GIM (*англ.* Global Ionosphere Maps), включающие значения вертикального ПЭС в единицах TECu (1 TECu = 10^{16} электронов/м^2). Карты GIM используются для исследования солнечных вспышек и затмений, геомагнитных бурь, землетрясений, запусков ракет, взрывов и др. (Афраймович, Перевалова, 2006; Hofmann-Wellenhof et al., 2008; Oikonomou et al., 2021).

Уровень ПЭС над некоторой точкой поверхности Земли изменяется под воздействием комплекса факторов: солнечная и геомагнитная активность, суточное и сезонное изменение освещённости, атмосферные процессы, крупные геодинамические и техногенные события.

Поэтому выделение аномальных возмущений ПЭС требует предварительного определения регионального фонового состояния ионосферы и диапазона его естественной изменчивости.

Особый интерес представляют исследования ионосферных возмущений при подготовке и реализации сильных землетрясений в тектонически активных районах Земли (Имашев, Свердлик, 2022; Oikonomou et al., 2021; Pulinets et al., 2022). Такая задача важна и для сейсмоактивного региона Тянь-Шаня, где наряду с регулярными гелио- и геофизическими вариациями наблюдаются ионосферные отклики на сильные литосферные процессы (Имашев, Кузиков, 2024). Интерпретация отдельных аномалий ПЭС без учёта многолетнего, сезонного и суточного фона может приводить к ошибочному отнесению регулярных вариаций к возмущениям необычной природы.

В этой работе исследуются крупномасштабные фоновые вариации ПЭС над Западным и Центральным Тянь-Шанем с дискретностью от часов до нескольких лет. Проанализированы глобальные ионосферные карты Лаборатории реактивного движения JPL (*англ.* Jet Propulsion Laboratory) за 2000–2023 гг., охватывающие более двух циклов солнечной активности. Разрешающая способность этих данных позволяет изучать почасовые вариации ПЭС с детальностью ~280 км по широте и до 450 км по долготе.

Цель работы состоит в выявлении и количественной характеристике устойчивых пространственных и временных закономерностей изменения ПЭС над Тянь-Шанем для формирования региональной фоновой модели, необходимой при последующем выделении крупномасштабных аномальных возмущений естественного и техногенного происхождения. Также затрагиваются вопросы сравнения уровней ПЭС над Тянь-Шанем и прилегающих областей в меридиональном направлении, в частности с экваториальной ионосферной аномалией (ЭИА), как ежедневного проявления самого значительного возмущения в ионосфере.

Для достижения этой цели изучена пространственная однородность и временные периодичности в вариациях ПЭС в пределах исследуемой территории. Показана связь изменения уровней ПЭС с солнечной и геомагнитной активностью, с особенностями ЭИА. Полученные статистические характеристики могут рассматриваться как основа для последующего анализа отдельных аномальных эпизодов, включая возможные ионосферные отклики на сильные землетрясения.

Данные и методы исследования

Использованы почасовые карты ПЭС по данным JPL с пространственным разрешением 2,5° по широте и 5° по долготе за 2000–2023 гг. (https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/grif/Maps/TEC/). Интервал в 24 года охватывает более двух 11-летних циклов солнечной активности и позволяет получить представительные характеристики многолетних, сезонных и суточных вариаций.

Исследуемая область ограничена координатами 40–45° с. ш. и 70–80° в. д. и охватывает территорию Западного и Центрального Тянь-Шаня. Более детальный анализ выполняется для узла сетки GIM с координатами 42,5° с. ш. и 75° в. д., расположенного в центральной части Бишкекского геодинамического полигона Научной станции РАН. Репрезентативность выбранной точки для рассматриваемого региона оценивается сравнением многолетних средних значений ПЭС в соседних узлах сетки GIM.

Карты GIM — результат обработки глобальной сети ГНСС-наблюдений и последующей пространственной интерполяции данных. Точность расчёта ПЭС в узлах зависит от плотности сети ГНСС-станций, геометрии созвездия спутников и используемых алгоритмов построения карт. Поскольку глобальные ионосферные карты представлены более чем 30-летним набором однородных данных, рассчитанных по единой методике для всего земного шара, то их корректно использовать в качестве основы для исследования многолетнего фонового состояния ионосферы с разрешением порядка 300–450 км.

Для сравнения и интерпретации выявленных закономерностей изменения ПЭС использовались данные об уровне солнечной активности, о состоянии геомагнитного поля и про-

явлении региональной сейсмичности. Так индекс F10.7 представляет собой интегральный поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см (2800 МГц), измеряется в солнечных потоковых единицах (*англ.* solar flux unit — sfu; 1 sfu = 10^{-22} Вт·м$^{-2}$·Гц$^{-1}$). Этот индекс используется в качестве прокси-параметра солнечной активности, так как хорошо коррелирует с уровнем ультрафиолетового излучения, определяющего уровень ионизации верхней атмосферы. В работе значения F10.7 использовались для анализа связи многолетних и сезонных вариаций ПЭС с изменениями солнечной активности.

Для оценки влияния интегральных геомагнитных возмущений использован планетарный индекс Ap, который имеет линейную шкалу и удобен для количественного сопоставления с изменениями ПЭС. Данные индексов F10.7 и Ap доступны в открытых архивах Немецкого центра геоисследований (*нем.* Helmholtz-Zentrum für Geoforschung) (https://kp.gfz-potsdam.de/en/data).

Информация о сильных землетрясениях доступна в каталогах Геологической службы США (*англ.* United States Geological Survey) (https://earthquake.usgs.gov). На территории Тянь-Шаня уже были отмечены пред- и ко-сейсмические аномальные вариации ПЭС в январе 2024 г. (Имашев, Кузиков, 2024). Данные о землетрясениях в настоящей работе привлекаются только для качественной интерпретации отдельных аномальных состояний ионосферы и иллюстрации возможных направлений дальнейшего применения полученных фоновых характеристик ПЭС.

Периодические компоненты почасового ряда ПЭС исследовались методом непрерывного вейвлет-преобразования, обеспечивающего временную локализацию спектральных составляющих. Непрерывное вейвлет-преобразование выполнялось для почасового ряда ПЭС в точке 42,5° с. ш., 75° в. д. за 2000–2023 гг. с использованием комплексного вейвлета Морле (Cohen, 2014):

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) \mathrm{d}t,$$

где a — масштаб; b — временной сдвиг; ψ^* — комплексно-сопряжённая функция Морле.

В нашем случае рассчитывался модуль коэффициентов $|W(a, b)|$, характеризующий выраженность вариаций ПЭС (цветовая шкала вейвлетограммы) на разных временных масштабах (вертикальная ось) в каждый момент времени наблюдения (по горизонтали). Коэффициенты непрерывного вейвлет-преобразования представлены в условных единицах и служат для выявления доминирующих периодичностей, определения времени их проявления и сравнительной оценки их интенсивности.

Результаты анализа вариаций ПЭС и их обсуждение

Для общего представления о глобальном распределении и возможных экстремальных уровнях состояния ионосферы рассмотрим полусферические карты GIM в моменты максимального и минимального суточного значения ПЭС над Тянь-Шанем (*рис. 1*).

При дневной ионосфере (левое полушарие на *рис. 1*) проявляется ЭИА в виде полосы пониженных значений ПЭС вдоль магнитного экватора, которая разделяет два параллельных гребня повышенной ионизации. На последовательных по времени фрагментах GIM можно исследовать почасовую динамику возникновения и угасания ЭИА. В утренние часы, под воздействием солнечного излучения с востока на запад, в ионосфере возникает экваториальная электроструя, которая в сочетании с перпендикулярными линиями магнитного поля создаёт условия для выталкивания плазмы вверх над магнитным экватором с последующим растеканием зарядов в стороны и вниз ((Брюнелли, Намгаладзе, 1988; Hargreaves, 2003; Kelley, 2009) и др.). В результате такого фонтан-эффекта и формируются два гребня максимальных значений ПЭС на удалении до 15–20° от магнитного экватора. Такая дивергентная миграция заряженных частиц от ЭИА вдоль меридианов может оказывать влияние на уровень ПЭС над исследуемой территорией.

С учётом территории исследования и детальности карт GIM анализу подлежит пространство 40–45° с. ш. и 70–80° в. д. за 2000–2023 гг. наблюдений за уровнем ПЭС (*рис. 2*).

Основная часть Тянь-Шаня расположена в границах Кыргызстана и доступна авторам для комплексного геофизического исследования. На *рис. 2* отрезками показаны меридианы и параллели, пересечения которых обозначают места с доступными данными о ПЭС, и внешний их периметр, отражающий территорию численного анализа (четырёхугольник на *рис. 1*).

Учитывая закономерности глобального распределения вариаций ПЭС (см. *рис. 1*) рассмотрим средние уровни ионизации вдоль меридианов территории исследования (*рис. 3*).

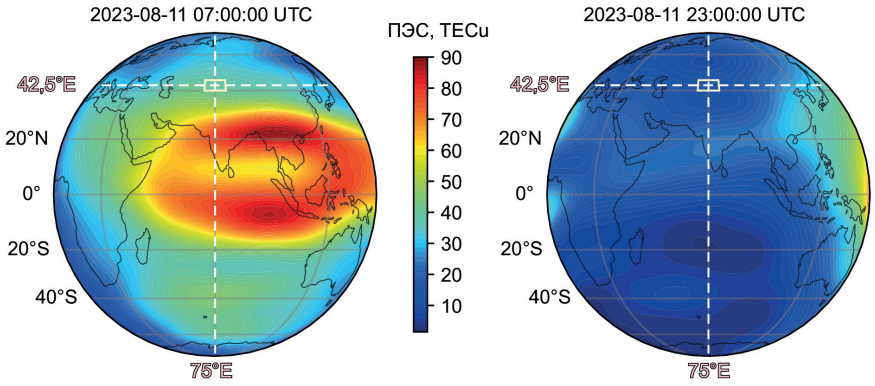


Рис. 1. Фрагменты карт GIM для земного шара с ориентировкой на исследуемую территорию с центром в 42,5° с. ш. и 75° в. д.: эпоха с максимальным (*слева*) и минимальным (*справа*) значением ПЭС за сутки в указанной позиции

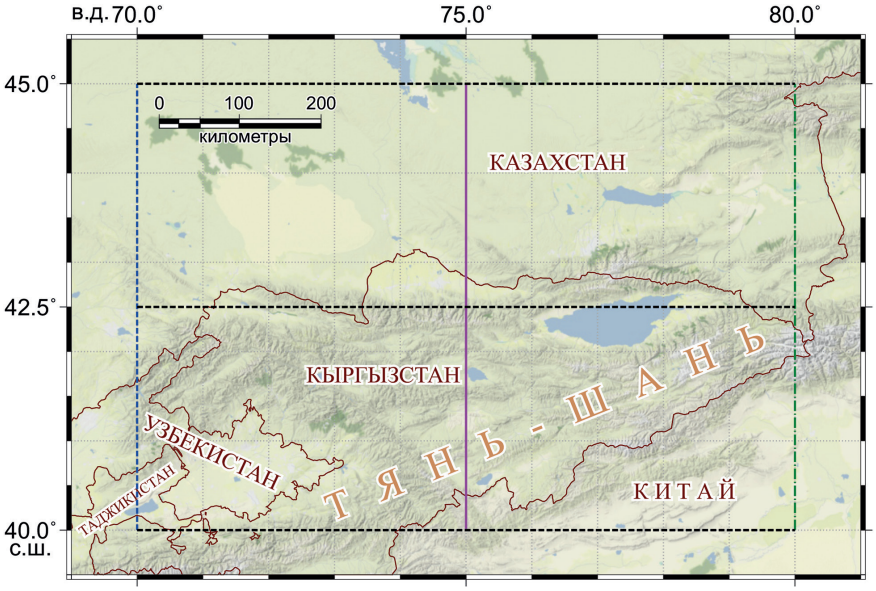


Рис. 2. Исследуемая область Западного и Центрального Тянь-Шаня в Центральной Азии

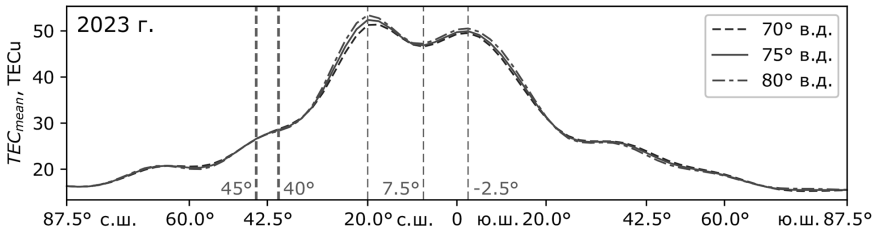


Рис. 3. Распределение средних значений ПЭС (TEC_{mean} по 8760 ч наблюдений) за 2023 г. с дискретностью 2,5° вдоль меридианов 70, 75 и 80° в. д.

Каждый профиль *рис. 3* состоит из 71 точки с шагом 2,5° по широте, каждая точка — среднее всех величин ПЭС за 2023 г. Для разных лет исследуемого периода формы таких графиков мало отличаются друг от друга, но уровни максимальных значений TEC_{mean} зависят от фазы солнечного цикла. При повышенной активности Солнца максимально проявляются различия для TEC_{mean} разных долгот и составляют не более 2 TECu для территории 40–45° с. ш. и 70–80° в. д. Поэтому дальнейший анализ для простоты изложения и без существенной потери информации будет представлен для центрального узла 42,5° с. ш., 75° в. д.

По модели IGRF-13 (*англ.* International Geomagnetic Reference Field: the 13th generation) в 2021 г. по восточной долготе 75° магнитный экватор смещён на 7° к северу от географического экватора (Alken et al., 2021). В 2023 г. минимум ПЭС в области ЭИА (см. *рис. 3*) фиксирует положение магнитного экватора на ~7,5° с. ш. Это согласуется с геомагнитными данными и даёт возможность определять положение магнитного экватора, а также исследовать асимметрию ЭИА в разные эпохи наблюдений. В результате смещения магнитного экватора к северу уровень ПЭС по 75° в. д. в точке 42,5° с. ш. в среднем более высокий, чем в точке 42,5° ю. ш.

На *рис. 3* наблюдается ниспадающий тренд ПЭС при удалении от экваториальной области к полюсам, что свидетельствует о продуцировании основной массы заряженных частиц в области ЭИА. Граница исследуемой территории расположена в ~20° севернее от ближайшего гребня ЭИА и у основания её северного «склона», что предполагает влияние ЭИА на уровень ПЭС и над Тянь-Шанем. Плавный характер тренда ПЭС показывает, что состояние ионосферы над Тянь-Шанем следует рассматривать в контексте общей широтной структуры ионосферы, формируемой под воздействием силы и угла атаки солнечного излучения, региональных электродинамических процессов и перераспределения плазмы.

Результаты непрерывного вейвлет-преобразования почасового ряда ПЭС позволяют анализировать изменение интенсивности периодических компонент различного временного масштаба на протяжении всего интервала наблюдений (*рис. 4*).

Наиболее выраженная компонента имеет период около 4000 дней и соответствует 11-летнему циклу солнечной активности. Минимальная интенсивность этой компоненты наблюдается в 2005–2010 и 2016–2020 гг., т. е. в периоды пониженной солнечной активности. Годовая компонента характеризует сезонную изменчивость ПЭС, а менее выраженная полугодовая компонента усиливается в годы высокой солнечной активности. Охват более двух 11-летних циклов солнечной активности (2000–2023) для анализа ПЭС также обусловлен и особенностями вековых вариаций солнечных и геомагнитных индексов (Птицына, Демина, 2023; Hajra et al., 2021). Сопоставление ПЭС с индексом F10.7, который широко используется как прокси-параметр уровня солнечной активности, приведено на *рис. 5*. Среднемесячные значения ПЭС и F10.7 имеют высокую положительную корреляцию Пирсона ($r = 0{,}886$, $p < 0{,}001$), в частности, в годы повышенной солнечной активности амплитуда внутригодовых вариаций ПЭС также существенно возрастает.

Если многолетняя цикличность в атмосферных параметрах Земли в основном связана с процессами внутри Солнца, то сезонная повторяемость в характеристиках нашей атмосферы зависит от геометрических и кинематических особенностей взаимодействия Земли и Солнца. Эллиптическая орбита ежегодно 2–5 января сближает нашу планету с источником световой энергии на дистанцию ~147 млн км (при орбитальной скорости до ~30,3 км/с), и Земля удаляется от Солнца 3–6 июля на расстояние ~152 млн км (~29,3 км/с). Наклон земной оси суточного вращения (~23,45°) относительно нормали к орбитальной плоскости создаёт условия для освещения одних и тех же участков геоида под разными углами и на разном удалении от источника света. В результате чего для северного полушария выделяются эпохи по сезонам года с крайними соотношениями длительности дня и ночи. Самый короткий день будет в эпоху зимнего солнцестояния 22–23 декабря, весеннее равноденствие — 20–21 марта, самый длительный день — 21–22 июня, осеннее равноденствие — 22–23 сентября (Михайлов, 1984; Солнечная..., 2017; Lang, 2011).

На *рис. 6* значения ПЭС в годы высокой солнечной активности (2014, 2023) более чем в 3 раза превышают соответствующие значения в год низкой солнечной активности (2019).

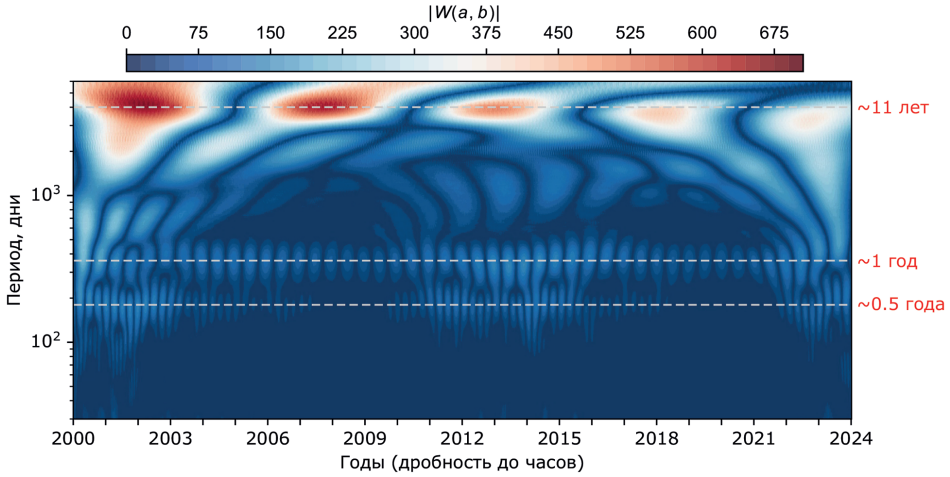


Рис. 4. Вейвлетограмма модуля коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования почасового ряда ПЭС для точки 42,5° с. ш., 75° в. д. за 2000–2023 гг. Отмеченные горизонтальные уровни соответствуют наиболее выраженным периодическим компонентам временного ряда с характерными периодами около 11 лет, 1 и 0,5 года соответственно. Цветовая шкала характеризует величину коэффициента $|W(a, b)|$



Рис. 5. Многолетние вариации среднемесячных значений ПЭС и индекса солнечной активности F10.7 за период 2000–2023 гг. для точки 42,5° с. ш. и 75° в. д.

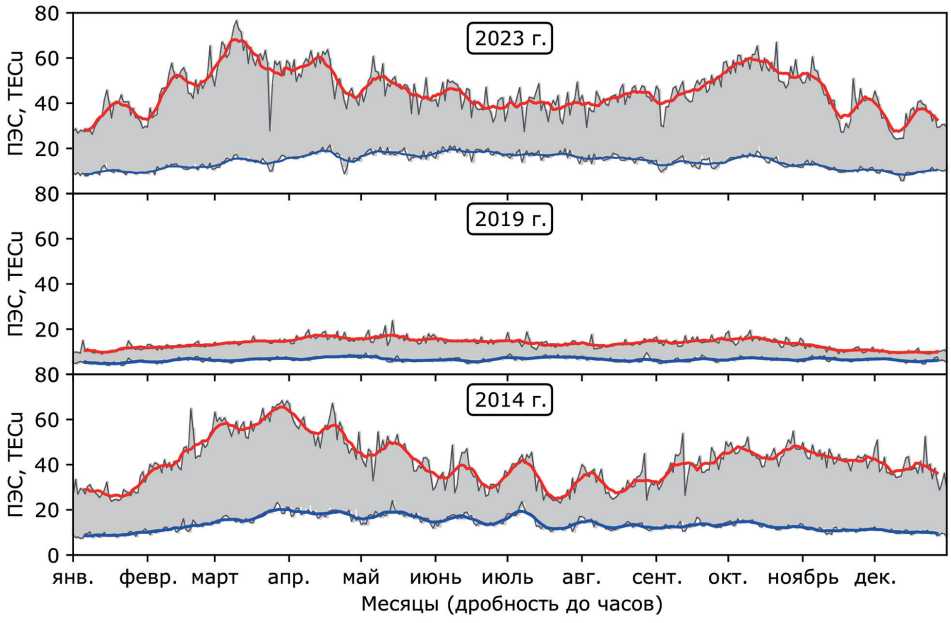


Рис. 6. Почасовые значения ПЭС (светло-серая область) над точкой 42,5° с. ш. и 75° в. д. за годы высокой (2014 и 2023) и низкой (2019) солнечной активности. Тёмно-серые огибающие линии сверху и снизу — суточные максимумы и минимумы. Утолщённые красные и синие линии — суточные максимумы и минимумы, сглаженные скользящим окном по 10 дней

Кроме сезонной цикличности на графиках сглаженных экстремумов ПЭС проявляются ~27-дневные периоды, связанные с вращением Солнца вокруг своей оси (Клименко и др., 2021). Для исследованных нами лет в годы высокой активности Солнца дневные максимумы ПЭС составляют 25–70 TECu и ночные минимумы — 8–20 TECu. В годы низкой солнечной активности эти же показатели изменяются в пределах 9–18 и 5–8 TECu соответственно. Ежегодные зимние минимумы ПЭС приходятся на декабрь – январь, весеннее повышение — на март – апрель, летнее понижение — на июнь – июль, осеннее повышение — на сентябрь – октябрь.

Сезонные экстремальные уровни ПЭС часто фиксируются с запаздыванием (до месяца) относительно сезонных астрономических эпох. В единичных работах по статистической оценке уровней ПЭС (Bagiya et al., 2009; D'ujanga et al., 2017; Ogwala et al., 2019) отмечается похожее распределение экстремумов ПЭС по месяцам в экваториальных частях Индии и Африки. Конечно, для низко- и среднеширотных областей существенно отличаются геомагнитные условия и параметры солнечной освещённости, однако сезонные статистические экстремумы ПЭС для этих регионов совпадают с точностью до месяца.

При наложении графиков внутрисуточной периодичности ПЭС для Тянь-Шаня за год всегда среднесуточный максимум приходится на весну (чаще — на март), а среднесуточные минимумы ПЭС выпадают на декабрь – январь (*рис. 7*).

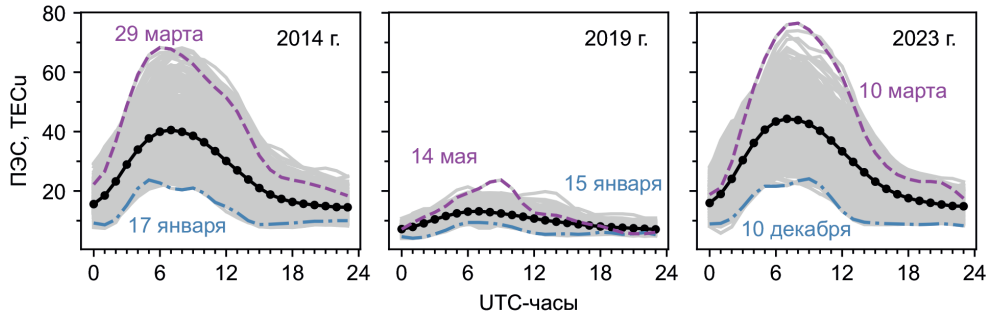


Рис. 7. Почасовые значения ПЭС (светло-серые треки) над точкой 42,5° с. ш. и 75° в. д. Малиновые пунктиры и голубые штрих-пунктиры — соответственно вариации ПЭС с максимальным и минимальным среднесуточным уровнем за год. Чёрные линии с круглыми маркерами — среднегодовой тренд ПЭС

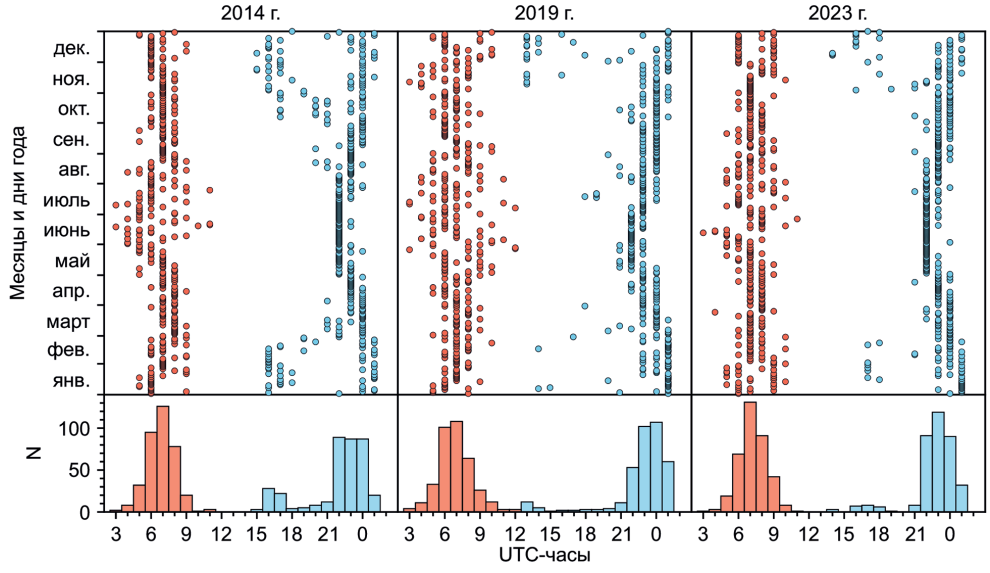


Рис. 8. Максимальные (красный цвет) и минимальные (голубой) ПЭС в зависимости от дней года и UTC-часов над точкой 42,5° с. ш. и 75° в. д. (*сверху*). Гистограммы частот распределения экстремумов ПЭС за год наблюдения по UTC-часам (*снизу*)

В среднем ПЭС возрастает от начала суток (+6 ч для местного времени) до 06:00–08:00 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time), после чего постепенно снижается, при этом утренний рост происходит быстрее последующего спада. Детальное распределение экстремальных ПЭС по часам приведено на *рис. 8*.

Для рассмотренных лет существенной зависимости времени внутрисуточных экстремумов от уровня солнечной активности не выявлено. Максимумы наиболее часто наблюдаются около 07:00 UTC (13:00 местного времени), минимумы — в 22:00–24:00 UTC (04:00–06:00 местного времени). Разброс по времени для максимумов ПЭС возрастает летом, а внутрисуточный разброс минимумов наиболее заметен зимой. Устойчивое (разброс 2–4 ч) проявление максимумов и минимумов выпадает на март – апрель и сентябрь – октябрь.

Помимо регулярных циклов, на ПЭС воздействуют кратковременные геомагнитные возмущения, интенсивность и повторяемость которых зависят от солнечной активности (Campbell, 2003). Пример отклика ПЭС на сильную магнитную бурю приведён на *рис. 9*, во время которой максимумы среднесуточного Ap и ПЭС совпали. При этом рост ПЭС начался примерно за два дня до максимума Ap, а уже на следующий день значения ПЭС снизились до минимального уровня, хотя повышенная геомагнитная активность сохранялась. Такая асинхронность отражает различие между планетарным индексом Ap и локальным ионосферным откликом.

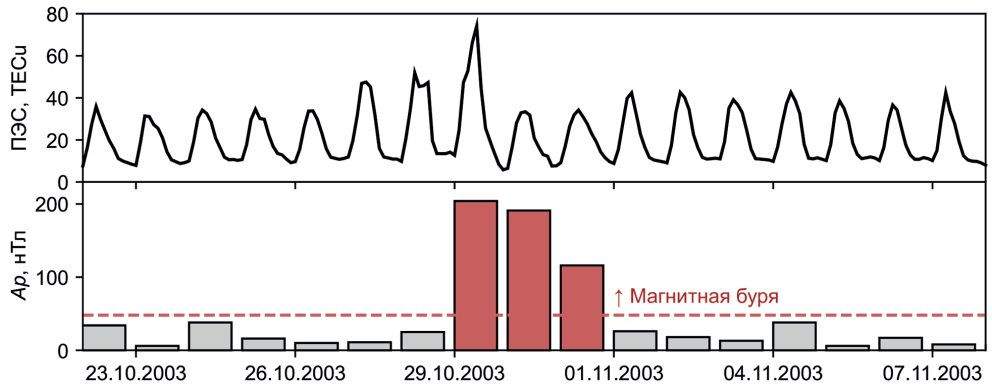


Рис. 9. Почасовые вариации ПЭС над точкой 42,5° с. ш. и 75° в. д. до, во время и после сильной магнитной бури по среднесуточному геомагнитному индексу Ap в 2003 г.

Вариации ПЭС могут коррелировать и с геодинамическими процессами в земной коре, в частности со временем подготовки и реализации землетрясений (Афраймович, Перевалова, 2006; Hofmann-Wellenhof et al., 2008; Oikonomou et al., 2021).

На Тянь-Шане была показана пространственно-временная связь процесса подготовки и реализации сильного Учтурфанского землетрясения (Китай) 22.01.2024 с аномальными изменениями уровней ПЭС в этом регионе (Имашев, Кузиков, 2024). При этом необходимо добавить, что такие изменения уровня ПЭС происходили на фоне спокойного геомагнитного поля в январе 2024 г. и не могут быть связаны с этим фактором влияния на ионосферу.

Заключение

По данным GIM JPL за 2000–2023 гг. установлена высокая пространственная однородность среднегодового ПЭС в пределах Западного и Центрального Тянь-Шаня. Различия среднегодовых значений ПЭС между рассматриваемыми узлами сетки GIM не превышают 2 TECu, что позволяет использовать характеристики центральной точки 42,5° с. ш., 75° в. д. в качестве репрезентативных для исследуемой территории.

Выявлены иерархии периодических компонент, в многолетнем ряду значений ПЭС показано наличие сравнительно устойчивых циклических составляющих, определяемых гелио-

и геофизическими факторами. Доминирующим здесь представляется 11-летний цикл солнечной активности, хорошо коррелирующий с вариациями F10.7-индекса. Достаточно отчётливо выражены годовая и полугодовая периодичности во временных рядах ПЭС.

При анализе особенностей внутригодового хода фиксируются максимумы ПЭС весной (март–апрель) и осенью (сентябрь–октябрь), а зимой (декабрь–январь) и летом (июнь–июль) — минимумы. Причём абсолютные максимумы и минимумы наступают с запаздыванием до месяца относительно соответствующих астрономических эпох не только над Тянь-Шанем, но и над другими регионами планеты. Наблюдаемая полугодовая особенность сезонной изменчивости ПЭС определяется совокупным влиянием сезонных изменений солнечного освещения, термосферной циркуляции, состава нейтральной атмосферы и электродинамических процессов.

При исследовании почасовых значений достаточно определённо регистрируются 27-дневные вариации ПЭС, связанные с вращением Солнца вокруг своей оси.

В суточном ходе зафиксировано устойчивое проявление максимума в 07:00 UTC (13:00 местного времени) и минимума в интервале 22:00–24:00 UTC (04:00–06:00 местного времени), при этом скорость утреннего роста ПЭС превышает скорость его вечернего спада.

В годы повышенной активности дневные сглаженные максимумы ПЭС варьируют в пределах 25–70 TECu, а ночные сглаженные минимумы — 8–20 TECu. В годы низкой солнечной активности эти показатели снижаются до 9–18 и 5–8 TECu соответственно.

В периоды геомагнитных бурь наблюдаются изменения уровня ПЭС, имеющие некоторую асинхронность во времени с индексом Ap, что указывает на сложную динамику ионосферного отклика. На примере Учтурфанского землетрясения (22.01.2024) показано наличие аномальных изменений ПЭС на фоне спокойной геомагнитной обстановки, что может свидетельствовать о возможных литосферно-ионосферных связях.

Полученные в работе результаты создают основу для идентификации и анализа аномальных состояний ионосферы над Тянь-Шанем. Выявленные фоновые характеристики ПЭС и закономерности их цикличности позволяют обоснованно выделять отклонения, вызванные случайными факторами, включая геодинамические процессы, и вносят вклад в развитие региональных моделей ионосферы для сейсмически опасных территорий.

Авторы выражают благодарность сотрудникам центра анализа данных ионосферы JPL Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) и Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Мирового центра данных по геомагнетизму при Киотском университете (*англ.* World Data Center for Geomagnetism and Space Magnetism) за предоставление свободного доступа к данным.

Проведённые исследования выполнены в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке, темы № 1025032800041-4-1.5.1 и 1025032800066-3-1.5.1.

Литература

1. *Афраймович Э. Л.*, *Перевалова Н. П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Ин-т солнечно-земной физики СО РАН, ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
2. *Брюнелли Б. Е.*, *Намгаладзе А. А.* Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
3. *Гаврилов Н. М.* Измерение характеристик атмосферы методом наземного радиоприема навигационных спутниковых систем. СПб.: СПбГУ, 2007. 31 с.
4. *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.
5. *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.

6. *Клименко М. В.*, *Клименко В. В.*, *Ратовский К. Г.*, *Ясюкевич А. С.* Запаздывание отклика глобального электронного содержания и электронной концентрации на различных высотах на 27-дневные вариации солнечной активности // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 5. С. 75–80. DOI: 10.31857/S0207401X21050058.
7. *Михайлов А. А.* Земля и ее вращение. М.: Наука, 1984. 80 с.
8. *Птицына Н. Г.*, *Демина И. М.* Влияние цикла Глейсберга на вариации периода 11-летнего цикла солнечной активности в 1700–2021 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. 2023. Т. 63. № 3. С. 284–297. DOI: 10.31857/S0016794022600508.
9. Солнечная система / под ред. В. Г. Сурдина. М.: Физматлит, 2017. 460 с.
10. *Alken P.*, *Thébault E.*, *Beggan C. D. et al.* International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // Earth, Planets and Space. 2021. V. 73. Article 49. 25 p. DOI: 10.1186/s40623-020-01288-x.
11. *Bagiya M. S.*, *Joshi H. P.*, *Iyer K. N. et al.* TEC variations during low solar activity period (2005–2007) near the Equatorial Ionospheric Anomaly Crest region in India // Annales Geophysicae. 2009. V. 27. P. 1047–1057. DOI: 10.5194/angeo-27-1047-2009.
12. *Campbell W. H.* Introduction to geomagnetic fields. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 337 p.
13. *Cohen M. X.* Analyzing neural time series data: Theory and practice. Cambridge: MIT Press, 2014. 615 p.
14. *D'ujanga F. M.*, *Opio P.*, *Twinomugisha F.* Variation of the total electron content with solar activity during the ascending phase of solar cycle 24 observed at Makerere University, Kampala // Ionospheric Space Weather. Longitude and Hemispheric Dependences and Lower Atmosphere Forcing. Hoboken: John Wiley and Sons, 2017. P. 145–154.
15. *Hajra R.*, *Marques de Souza Franco A.*, *Echer E.*, *Alves Bolzan M. J.* Long-term variations of the geomagnetic activity: A comparison between the strong and weak solar activity cycles and implications for the space climate // J. Geophysical Research: Space Physics. 2021. V. 126. Article e2020JA028695. 14 p. DOI: 10.1029/2020JA028695.
16. *Hargreaves J. K.* The solar-terrestrial environment. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 420 p.
17. *Hofmann-Wellenhof B.*, *Lichtenegger H.*, *Wasle E.* GNSS — Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Wien, N. Y.: Springer, 2008. 516 p.
18. *Kelley M. C.* The Earth's ionosphere: Plasma physics and electrodynamics. San Diego: Academic Press, 2009. 556 p.
19. *Lang K. R.* The Cambridge Guide to the Solar System. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 475 p.
20. *Ogwala A.*, *Somoye E. O.*, *Ogunmodimu O. et al.* Diurnal, seasonal and solar cycle variation in total electron content and comparison with IRI-2016 model at Birnin Kebbi // Annales Geophysicae. 2019. V. 37. P. 775–789. DOI: 10.5194/angeo-37-775-2019.
21. *Oikonomou C.*, *Haralambous H.*, *Pulinets 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.
22. *Pulinets S.*, *Ouzounov D.*, *Karelin A.*, *Boyarchuk K.* Earthquake precursors in the atmosphere and ionosphere: New Concepts. Dordrecht: Springer Nature B. V., 2022. 294 p. DOI: 10.1007/978-94-024-2172-9.

Study of variations in total electron content of ionosphere over the Tien Shan

S. I. Kuzikov, S. A. Imashev

Research Station RAS in Bishkek City, Bishkek 720049, Kyrgyzstan
E-mail: sanzhar.imashev@gmail.com

The relevance of studying variations in the ionospheric total electron content (TEC) is associated with the need to identify anomalies related to natural and anthropogenic processes against the background of regular helio- and geophysical cycles. In this work, patterns and characteristics of TEC variations over the Western and Central Tien Shan during 2000–2023 are identified in order to establish a basis for detecting disturbances, including those of lithospheric origin. Using global ionospheric maps from the Jet Propulsion Laboratory (JPL) with a spatial resolution of 2.5×5° and an hourly time step, the spatial homogeneity of TEC over the study area (deviations ⩽2 TECu) is demonstrated, which allows

the use of data from a representative point at 42.5° N, 75° E. Based on the continuous wavelet transform, the dominance of the 11-year solar activity cycle is confirmed, and annual, semiannual, and 27-day periodicities in TEC variations are identified. For the Tien Shan region, during years of high solar activity the daytime TEC maxima vary within 25–70 TECu, while nighttime minima range from 8 to 20 TECu. During years of low solar activity these values decrease to 9–18 and 5–8 TECu, respectively. Seasonal TEC maxima occur in spring and autumn with a delay of up to one month relative to the equinoxes. For the diurnal TEC variation, the statistical maximum occurs at 07:00 UTC and the minimum at 22:00–24:00 UTC. The sensitivity of TEC to geomagnetic storms and to strong earthquakes is demonstrated. For the first time, regional background characteristics of the ionosphere over the Tien Shan have been obtained, which are necessary for reliable identification of anomalies of different origin.

Keywords: Tien Shan, ionosphere, GNSS, total electron content, TEC, solar and geomagnetic activity, lithosphere-ionosphere coupling

Accepted: 07.08.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-415-426

References

1. Afraimovich E. L., Perevalova N. P., *GPS-monitoring verkhnei atmosfery Zemli* (GPS-monitoring of the Earth's upper atmosphere), Irkutsk: ISTP SB RAS, SC RRS SB RAMS, 2006, 480 p. (in Russian).
2. Brunelli B. E., Namgaladze A. A., *Fizika ionosfery* (Physics of the ionosphere), Moscow: Nauka, 1988, 528 p. (in Russian).
3. Gavrilov N. M., *Izmerenie kharakteristik atmosfery metodom nazemnogo radiopriema navigatsionnykh sputnikovykh system* (Measuring atmospheric characteristics by ground-based radio reception of navigation satellite systems), Saint Petersburg: Saint Petersburg University, 2007, 31 p. (in Russian).
4. Imashev S. A., Kuzikov S. I., Anomalous variations in total electron content in the ionosphere and geodynamic conditions for the 7-magnitude Uchturpan earthquake of January 22, 2024, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 4, pp. 87–98 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-87-98.
5. 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, V. 19, No. 4, pp. 318–327 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-318-327.
6. Klimenko M. V., Klimenko V. V., Ratovsky K. G., Yasyukevich A. S., Delay in response of global electron content and electron concentration at various altitudes to 27-day variations in solar activity, *Russian J. Physical Chemistry B*, 2021, V. 15, No. 3, pp. 566–571, DOI: 10.1134/S1990793121030052.
7. Mikhailov A. A., *Zemlya i ee vrashchenie* (The Earth and its rotation), Moscow: Nauka, 1984, 80 p. (in Russian).
8. Ptitsyna N. G., Demina I. M., Influence of the Gleissberg cycle on variations of the 11-year cycle of solar activity in 1700–2021, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2023, V. 63, No. 3, pp. 248–260, DOI: 10.1134/S0016793222600862.
9. *Solnechnaya sistema* (Solar System), V. G. Surdin (ed.), Moscow: Fizmatlit, 2017, 460 p. (in Russian).
10. Alken P., Thébault E., Beggan C. D. et al., International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation, *Earth, Planets and Space*, 2021, V. 73, Article 49, 25 p., DOI: 10.1186/s40623-020-01288-x.
11. Bagiya M. S., Joshi H. P., Iyer K. N. et al., TEC variations during low solar activity period (2005–2007) near the Equatorial Ionospheric Anomaly Crest region in India, *Annales Geophysicae*, 2009, V. 27, pp. 1047–1057, DOI: 10.5194/angeo-27-1047-2009.
12. Campbell W. H., *Introduction to geomagnetic fields*, Cambridge: Cambridge University Press, 2003, 337 p.
13. Cohen M. X., *Analyzing neural time series data: Theory and practice*, Cambridge: MIT Press, 2014, 615 p.
14. D'ujanga F. M., Opio P., Twinomugisha F., Variation of the total electron content with solar activity during the ascending phase of solar cycle 24 observed at Makerere University, Kampala, In: *Ionospheric Space Weather. Longitude and Hemispheric Dependences and Lower Atmosphere Forcing*, Hoboken: John Wiley and Sons, 2017, pp. 145–154.
15. Hajra R., Marques de Souza Franco A., Echer E., Alves Bolzan M. J., Long-term variations of the geomagnetic activity: A comparison between the strong and weak solar activity cycles and implications for the space climate, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2021, V. 126, Article e2020JA028695, 14 p., DOI: 10.1029/2020JA028695.
16. Hargreaves J. K., *The solar-terrestrial environment*, Cambridge: Cambridge University Press, 2003, 420 p.

17. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E., *GNSS — Global Navigation Satellite Systems: GPS*, *GLONASS*, *Galileo*, *and more*, Wien, NewYork: Springer, 2008, 516 p.
18. Kelley M. C., *The Earth's ionosphere: Plasma physics and electrodynamics*, San Diego: Academic Press, 2009, 556 p.
19. Lang K. R., *The Cambridge Guide to the Solar System*, Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 475 p.
20. Ogwala A., Somoye E. O., Ogunmodimu O. et al., Diurnal, seasonal and solar cycle variation in total electron content and comparison with IRI-2016 model at Birnin Kebbi, *Annales Geophysicae*, 2019, V. 37, pp. 775–789, DOI: 10.5194/angeo-37-775-2019.
21. Oikonomou C., Haralambous H., Pulinets 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.
22. Pulinets S., Ouzounov D., Karelin A., Boyarchuk K., *Earthquake precursors in the atmosphere and ionosphere: New Concepts*, Dordrecht: Springer Nature B. V., 2022, 294 p., DOI: 10.1007/978-94-024-2172-9.