

Оценка корреляционного масштаба распределения полного электронного содержания в Европейском регионе с использованием вариограммного подхода по данным ГНСС-радиопросвечивания

И. А. Павлов, А. М. Падохин

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН, Троицк, Москва, 108840, Россия*

E-mail: ipavlov@izmiran.ru

*Московский государственный университет имени м. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия*

Представлен метод оценки корреляционного масштаба распределения полного электронного содержания ТЕС (*англ.* Total Electron Content) ионосферы по данным радиопросвечивания сигналами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Метод использует данные, полученные из базы данных Madrigal, для построения эмпирических вариограмм невязок ТЕС относительно 27-дневного медианного распределения электронной концентрации. Корреляционный масштаб определялся на основе подбора параметров гауссовой модели вариограммы, чтобы она наилучшим образом соответствовала полученным эмпирическим вариограммам. Анализ данных за 2018 г., характеризующийся низкой солнечной и геомагнитной активностью, показал, что в Европейском регионе корреляционный масштаб ТЕС демонстрирует сезонную изменчивость, увеличиваясь с ~1000 км в зимние месяцы до 2000–4000 км летом, что хорошо согласуется с изменчивостью регионального электронного содержания REC (*англ.* Regional Electron Content). На основе анализа вариограммных поверхностей выявлена существенная анизотропия корреляционного масштаба ТЕС, связанная с направлениями магнитного поля и нейтрального ветра на высотах максимума F2-слоя. Результаты исследования имеют практическое значение для задач адаптации ионосферных моделей и ассимиляции данных ТЕС с целью прогнозирования условий распространения радиоволн, а также для понимания динамики ионосферных процессов в средних широтах в целом.

Ключевые слова: ионосфера, ГНСС, корреляционный масштаб, вариограмма

Одобрена к печати: 10.02.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-385-397

Введение

Ионосфера Земли существенно влияет на функционирование радиотехнических систем, использующих в своей работе трансionoсферный радиоканал. Прежде всего это относится к системам дальней радиосвязи, радиолокации и глобальной спутниковой навигации. В связи с этим задача надёжного описания и прогнозирования пространственно-временных характеристик распределения ионосферной плазмы сохраняет свою актуальность. К настоящему времени разработано достаточно много методов прогноза распределения электронной концентрации в ионосфере, основанных на ассимиляции данных наблюдений. В большинстве своём они основаны на использовании той или иной эмпирической (реже самосогласованной) модели ионосферы, например IRI (*англ.* International Reference Ionosphere) (Bilitza et al., 2017) или NeQuick (Nava et al., 2008), и наблюдений, в качестве которых зачастую выступают данные либо вертикального зондирования (Pignalberi et al., 2018), либо зондирования глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС) (Qiao et al., 2021). В качестве методов ассимиляции применяется широкий спектр алгоритмов, включающий 3DVar/4DVar (*англ.* Three/Four Dimensional Variational Assimilation) (Bust, Immel, 2020; Bust et al., 2004; Yuan et al., 2023), классический и ансамблевый фильтры Калмана (Qiao et al., 2021; Tang et al., 2022), фильтр частиц, основанный на методе Монте-Карло (Reid et al., 2023), кригинг-интерполяцию (Lyu et al., 2024). В большинстве упомянутых выше методов ассимиляции данных

существенным моментом становится задание априорной ковариационной матрицы вектора состояния системы, а для этого как раз и необходимо оценить корреляционный масштаб в системе и его возможную изменчивость. Поскольку для многих практических приложений актуальной представляется задача прогнозирования распределения полного электронного содержания ТЕС (*англ.* Total Electron Content), а данные измерений ТЕС доступны на большом числе станций IGS (*англ.* International GNSS Service) (Mannucci et al., 1998) практически в режиме реального времени, встаёт задача оценки корреляционных масштабов именно для распределения ТЕС. В работе (Shim et al., 2008) были проведены исследования пространственных коэффициентов корреляции для межсуточных вариаций ТЕС на данных более тысячи станций и показано, что корреляционный масштаб, определяемый на основе коэффициента корреляции, больше в средних широтах, чем в низких, а также в дневное время по сравнению с ночным. Авторы также указали на анизотропию корреляционных масштабов с характерными меридиональными и зональными значениями 7 и 20° соответственно в средних широтах. Вместе с тем авторы не обнаружили значимой сезонной зависимости корреляционного масштаба межсуточных вариаций ТЕС. Значительное число работ использует для оценки корреляционных масштабов распределения ТЕС данные глобальных ионосферных карт (Forsythe et al., 2020; Lv et al., 2024). При этом для установления корреляционных масштабов применяются как невязки эмпирических моделей (IRI-2016 в работе (Forsythe et al., 2020)) относительно выбранных глобальных карт (IGS в публикации (Forsythe et al., 2020)), так и данные межсуточной изменчивости ТЕС, полученные по той же глобальной карте. Выполненное авторами сравнение показало, что корреляционные масштабы, оценённые с привлечением модели IRI-2016, оказались примерно в два раза больше определённых на основе данных о межсуточной изменчивости ТЕС. Такие различия могут быть связаны с особенностями аппроксимации поля ТЕС в модели и глобальной ионосферной карте. Кроме того, необходимо отметить, что достаточно грубое пространственное разрешение глобальных ионосферных карт накладывает ограничение снизу на возможные значения оцениваемых корреляционных масштабов. Поэтому для исследования отдельных регионов, как в настоящей статье, необходимо использовать данные ТЕС с более высоким пространственным разрешением, например данные Madrigal (Rideout, Coster, 2006). Для изучения корреляционных масштабов ионосферы на региональном масштабе в последнее время стали применять вариограммный подход. Так, в работе (Liu et al., 2024) для китайского региона проведён пространственновременной анализ параметров изотропных гауссовых вариограмм за 2014 и 2020 гг. Авторы показали, что модель вариограммы не может быть описана постоянным набором параметров, так как они сильно зависят от уровня солнечной и геомагнитной активности, а также демонстрируют значительные суточные и сезонные вариации. Отметим, что вариограммный подход также позволяет проанализировать анизотропию корреляционных масштабов при использовании соответствующих моделей теоретических вариограмм. В связи с этим цель настоящей работы заключается в оценке корреляционного масштаба регионального распределения ТЕС в Европе с использованием вариограммного подхода с учётом анизотропии на основе данных высокого разрешения Madrigal. Полученные результаты имеют практическое значение для разработки ассимиляционных моделей ионосферы, совершенствования систем навигации и связи, а также решения задач, связанных с мониторингом и прогнозированием космической погоды.

Входные данные и регион исследования

В настоящей работе оценки корреляционного масштаба проводятся для Европейского региона в пределах 10° з. д. – 42° в. д. и 33 – 75° с. ш. В данном регионе расположена одна из самых плотных сетей ГНСС-приёмников, позволяющая достичь необходимого высокого пространственно-временного разрешения поля ТЕС. Так, используемые в работе данные Madrigal ТЕС (Rideout, Coster, 2006) имеют пространственное разрешение $1 \times 1^\circ$ и временное разрешение 5 мин. Алгоритм получения распределения вертикального ТЕС в Madrigal заключается

в следующем. Используется метод кодово-фазового сглаживания для получения относительного наклонного TEC для каждой пары спутник – приёмник. Дифференциальные кодовые задержки (ДКЗ) спутников считаются априори известными и берутся из глобальных ионосферных карт JPL (*англ.* Jet Propulsion Laboratory). Оценка ДКЗ приёмников проводится различными методами в зависимости от того, принадлежит или нет приёмник близкорасположенной группе станций.

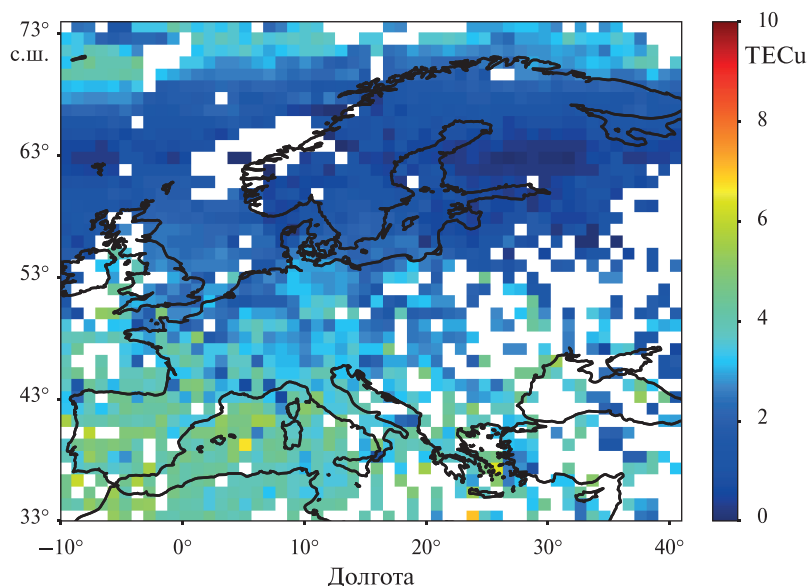


Рис. 1. Пример используемых данных для 20 марта 22:00 UT (*англ.* Universal Time)

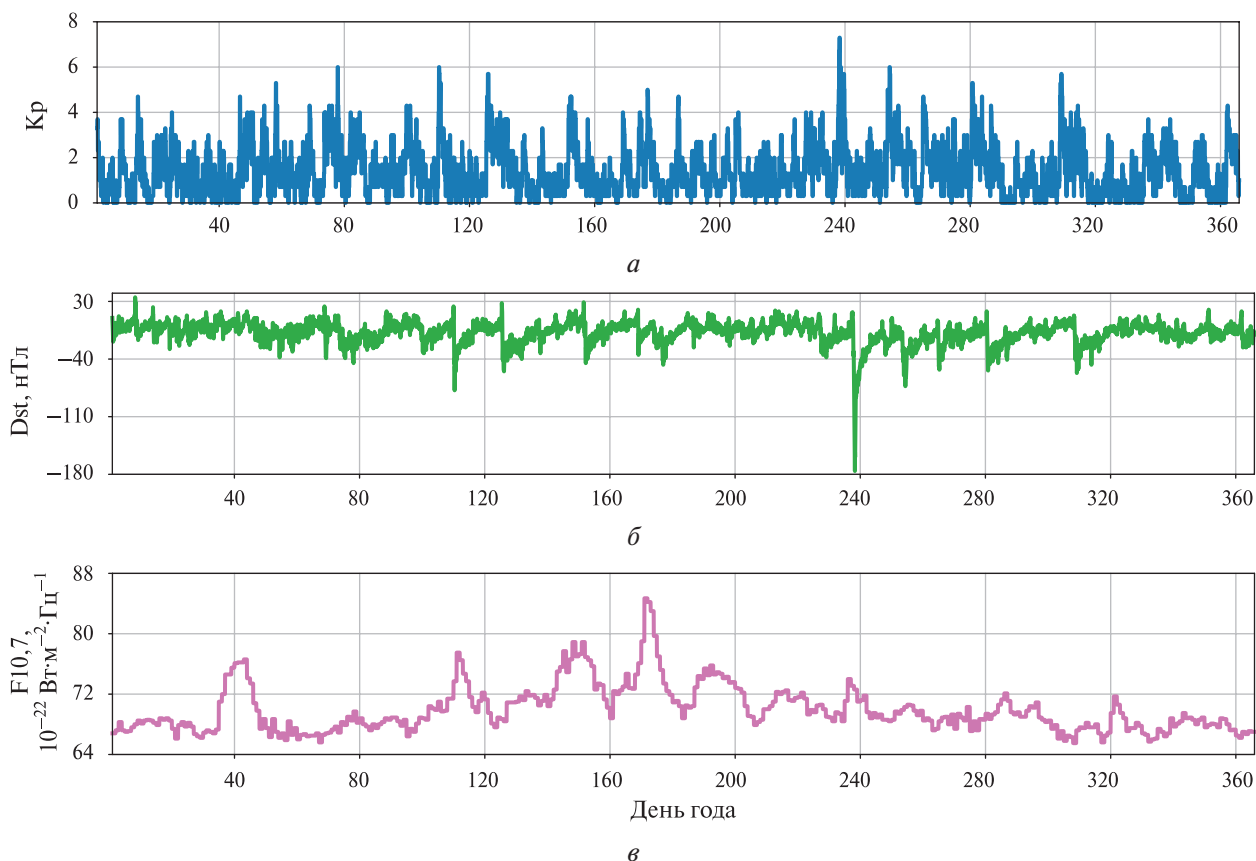


Рис. 2. Индексы Kp (а), Dst (б) и F10,7 (в) за 2018 г.

Для групп из трёх и более приёмников применяется метод наименьших квадратов для определения разницы ДКЗ между приёмниками группы и «метод расчёски» для вычисления их абсолютных значений. Предполагается, что разница измерений двух приёмников, наблюдающих один участок ионосферы, обусловлена разницей их аппаратных задержек, а значения ТЕС демонстрируют максимально «плоскую» зависимость от зенитного угла подионосферной точки вблизи местной полуночи. В случае одиночных станций ДКЗ приёмника оценивается таким образом, чтобы обеспечить равенство нулю минимального за 24-часовой период наблюдений значения ТЕС. Полученные после устранения ДКЗ абсолютные значения наклонного ТЕС пересчитываются в вертикальный ТЕС с использованием картирующей функции и бинируются в пространственные ячейки $1 \times 1^\circ$ с временным шагом 5 мин.

Пример данных приведён на *рис. 1* (см. с. 387). Хорошо видно, что, несмотря на достаточно плотную сеть приёмников в Европейском регионе, всё равно присутствуют области, в которых данные радиопросвечивания отсутствуют. Тем не менее количество данных (ячеек карты) оказывается достаточным для построения эмпирических вариограмм. Отметим также, что применяемый в системе Madrigal метод может приводить к смещённым оценкам ТЕС, особенно в случае одиночных приёмников. В настоящей работе используются данные Madrigal в рассматриваемом регионе за период 2018 г. Исследуемый период характеризуется низкой солнечной и умеренной геомагнитной активностью, что хорошо видно на *рис. 2* (см. с. 387), полученном на основе данных OmniWeb (Papitashvili, King, 2020).

Методика проведения исследования

Для оценки корреляционного масштаба распределения ТЕС в работе используется вариограммный подход, позволяющий определить, как меняется дисперсия значений исследуемого поля в зависимости от расстояния между точками. Для применения данного подхода исследуемое случайное поле должно быть пространственно стационарным, т. е. его совместная функция распределения должна быть инвариантна относительно сдвига начала координат. На практике чаще используется менее строгое условие стационарности второго порядка, предполагающее постоянство математического ожидания и зависимость ковариации только от расстояния между точками (Oliver, Webster, 2014), или ещё менее строгое условие, так называемая внутренняя гипотеза, которая предполагает стационарность второго порядка для приращений случайной функции. Стационарность второго порядка позволяет утверждать, что корреляционные функции зависят только от взаимного расположения точек, а не от их абсолютных координат. Очевидно, что данные предположения не выполняются для исследуемого поля ТЕС, однако, следуя работе (Oliver, Webster, 2014), можно ожидать, что они будут выполняться для невязок ТЕС относительно некоторой средней, невозмущённой модели, описывающей регулярные структуры в распределении ТЕС. Для этого можно было бы использовать модели IRI или NeQuick2, но, как показывают исследования (Yasyukevich et al., 2023), они дают значения ТЕС, смещённые относительно данных Madrigal. Поэтому в настоящей работе мы использовали 27-дневную медиану ТЕС для каждого узла сетки Madrigal (в расчёт брались только те узлы, для которых данные были доступны более чем в половине дней) для задания невозмущённого распределения ТЕС. Такой подход позволяет выделить в качестве невязок локальные особенности межсуточной изменчивости ионосферы на фоне крупномасштабных регулярных структур.

Оценка эмпирической вариограммы для момента времени t проводилась в работе по следующей формуле:

$$\gamma(h, t) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [\delta\text{TEC}(x_i + h, t) - \delta\text{TEC}(x_i, t)]^2, \quad (1)$$

где δTEC — невязка полного электронного содержания относительно 27-дневной медианы; x_i — координаты узлов широтно-долготной сетки; h — смещение между парой точек; n — число узлов сетки, отстоящих друг от друга не более чем на h .

Далее необходимо выбрать подходящую теоретическую модель вариограммы, которой будут аппроксимироваться полученные на основе данных наблюдений эмпирические вариограммы. Предложено много моделей теоретических вариограмм (Oliver, Webster, 2014), среди которых основными являются линейная, кубическая, степенная, экспоненциальная и гауссова. Выбор модели зависит от типа данных и исследуемых в них структур и представляет собой отдельную задачу. В ряде работ используется подход, где модель теоретической вариограммы может меняться в зависимости от данных (Pignalberi et al., 2018). Однако разные типы теоретических вариограмм по-разному определяют корреляционный масштаб, что не подходит для нашего случая. Поэтому, следуя за исследованием (Liu et al., 2024), мы использовали в работе гауссову модель вариограммы, которая задаётся следующим выражением:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \exp\{-h^2/a^2\}, & h \leq \sqrt{3} \cdot a, \\ C_0 + C, & h > \sqrt{3} \cdot a. \end{cases} \quad (2)$$

Оцениваемые параметры вариограммы — уровень свободной дисперсии C_0 , насыщение C и корреляционный масштаб a , который позволяет определить расстояние, на котором данные остаются пространственно коррелированными.

Вариограмма чувствительна к вариациям в данных, вследствие чего на больших расстояниях среднее значение полувариации может рассчитываться по малому числу точек, что негативно влияет на оценку параметров вариограммы. При наличии сильного детерминированного тренда, не устранённого или не до конца устранённого использованием 27-дневной медианы, оценённый корреляционный масштаб может существенно превышать размер исследуемого региона, что свидетельствует о невыполнении условия стационарности для остатков и, как следствие, о невозможности оценить корреляционный масштаб в данном случае. Поэтому аналогично (Forsythe et al., 2020) все оценки корреляционного масштаба более 10 000 км в нашей работе исключались из дальнейшего рассмотрения. Также для уменьшения влияния дальних корреляций и учёта количества пар точек в каждом интервале усреднения аппроксимация эмпирической вариограммы (1) теоретической гауссовой моделью (2) проводилась взвешенным методом наименьших квадратов. Веса задавались с учётом количества пар точек и расстояния между ними по следующей формуле: $w = n(h)/h$, где $n(h)$ — количество пар точек; h — расстояние между ними.

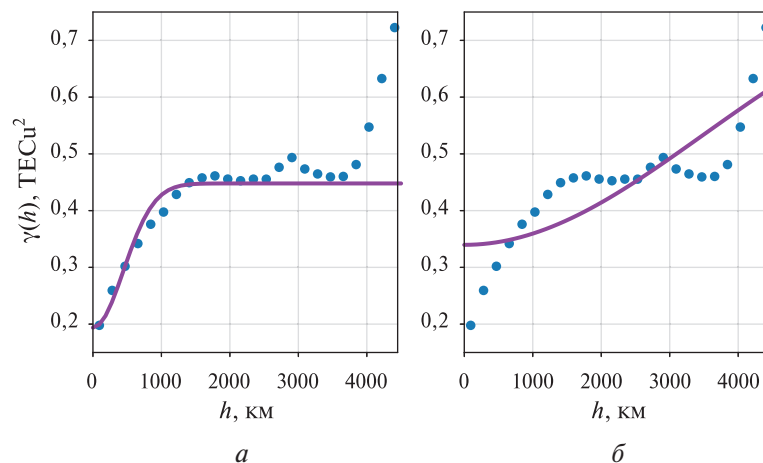


Рис. 3. Пример эмпирической вариограммы и её аппроксимация гауссовой моделью для 20 марта 01:30 UT. Случай с использованием весов (а) и без их учёта (б)

На рис. 3 приведены примеры эмпирических вариограмм (синие точки) невязок ТЕС относительно 27-дневной медианы и их аппроксимации теоретической моделью (лиловая линия). Слева представлена аппроксимация с учётом весов (с параметрами $C_0 = 0,194\text{TECu}^2$,

$C = 0,254 \text{TECu}^2$, $a = 628,9 \text{ км}$), которая использовалась при дальнейшем анализе, справа — пример аппроксимации вариограммы без учёта весов (с параметрами $C_0 = 0,340 \text{TECu}^2$, $C = 0,494 \text{TECu}^2$, $a = 4943,7 \text{ км}$). Видно, что использование весов позволяет в определённой мере уменьшить чувствительность метода наименьших квадратов к случайным выбросам данных и лучше описать эмпирическую вариограмму в рамках выбранной гауссовой модели на масштабе исследуемого региона, сохраняя корректные оценки свободной дисперсии (C_0). Отклонение эмпирической вариограммы от модельной, наблюдаемое в данном случае на больших смещениях, может говорить как о недостатках используемой в работе модели тренда (27-дневной медианы), так и о нарушении условия стационарности второго порядка на этих масштабах, что безусловно становится отдельным интересным предметом исследования, но выходит за рамки настоящей работы.

Результаты

В работе проведена оценка параметров вариограмм невязок ТЕС в Европейском регионе за 2018 г. с шагом по времени 15 мин описанным выше методом. Отдельно проанализированы суточные и сезонные вариации корреляционного масштаба. На *рис. 4* представлен суточный ход этого параметра по сезонам в окне 45 дней от момента солнцестояния или равноденствия. Из рисунка видны существенные различия в амплитуде суточного хода между сезонами. Зимой характерные значения варьируются от 800 до 1300 км, демонстрируя слабо выраженный суточный ход. Слабая выраженность суточных изменений зимой может быть связана с особенностями определения вертикального ТЕС в используемых алгоритмах Madrigal, прежде всего в зимние ночные часы при низких значениях νTEC (*англ.* Vertical TEC). Летом суточный ход проявляется отчётливо, с заметно большей амплитудой — в ночные часы наблюдаются оценки около 1300 км, тогда как дневные значения достигают почти 2700 км. В межсезонные периоды (весна и осень) амплитуда суточного хода меньше, а значения корреляционного масштаба находятся в диапазоне от ~1000 до ~2100 км.

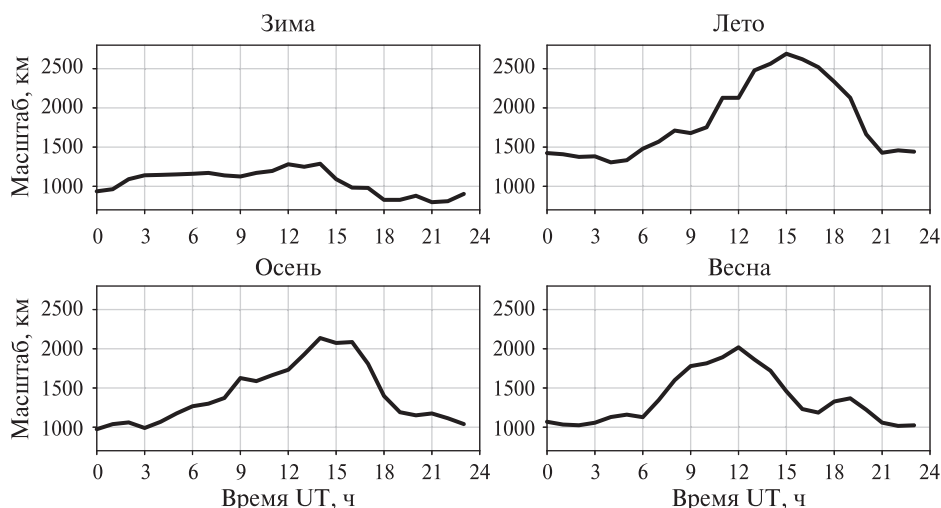


Рис. 4. Усреднённый суточный ход корреляционного масштаба для четырёх сезонов (зимы, лета, осени и весны) за 2018 г.

Для всех сезонов характерно наличие суточного максимума корреляционного масштаба, однако его временное положение и выраженность демонстрирует сезонную изменчивость. Наиболее выраженный пик наблюдается летом около 15:00 UT, а наименее выраженный — зимой (~12:00–13:00 UT). В весенний и осенний период максимум наблюдается примерно в 12:00 и 15:00 UT соответственно. Такой временной сдвиг положения максимума корреляционного масштаба может быть связан с высотой Солнца и продолжительностью светового дня.

На рис. 5 представлен результат оценки корреляционного масштаба, кривые на рис. 5а получены усреднением скользящим средним с суточным окном, на рис. 5б — с окном 27 дней.

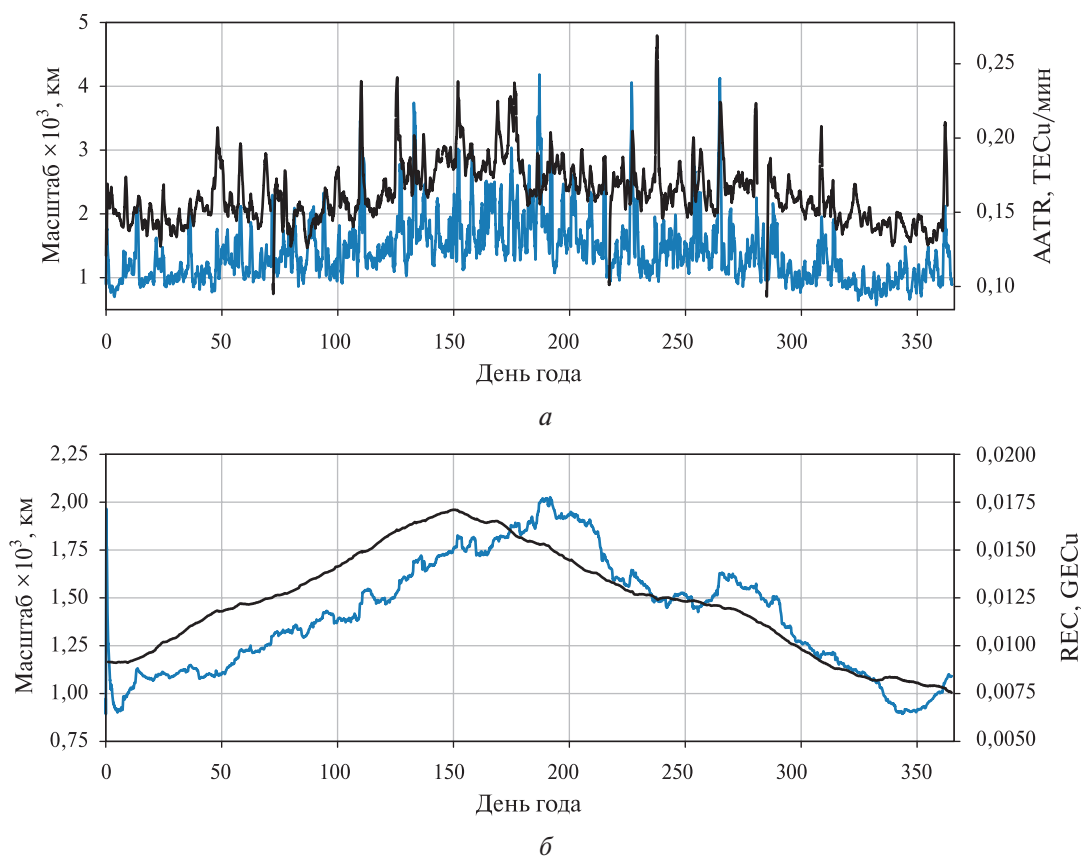


Рис. 5. Среднесуточное значение корреляционного масштаба (синяя линия) и усреднённого в Европейском регионе индекса AATR (чёрная линия) (а); 27-дневное среднее значение корреляционного масштаба (синяя линия) и регионального электронного содержания (чёрная линия) за 2018 г. (б)

Можно наблюдать широкий диапазон значений корреляционного масштаба в пределах от 1000 до 4000 км. Видно, что корреляционный масштаб имеет сезонный ход, аналогичный сезонному ходу регионального электронного содержания REC (*англ.* Regional Electron Content), также представленному на рис. 5б, коэффициент корреляции R 27-дневных средних значений корреляционного масштаба и REC достигает 0,83. В зимние месяцы наблюдается минимум средних значений корреляционного масштаба, в то время как в летние — максимум. Отметим также значительную межсуточную изменчивость корреляционного масштаба даже в рассматриваемых здесь спокойных условиях низкой солнечной активности. Чтобы рассмотреть межсуточные вариации корреляционного масштаба, было проведено сопоставление с одним из широко используемых индексов ионосферной возмущённости AATR (*англ.* Along Arc TEC Rate), который рассчитывается как среднее абсолютное значение производной TEC по времени для отдельного приёмника (Juan et al., 2018). На рис. 5а также приведены усреднённые для рассматриваемого региона масштаб и индекс AATR с суточным окном усреднения. Несмотря на относительно невысокий ($R = 0,54$) коэффициент корреляции между среднесуточным индексом AATR и корреляционным масштабом, можно видеть, что росту индекса AATR зачастую соответствует рост корреляционного масштаба. Это может свидетельствовать либо о том, что основная наблюдаемая ионосферная возмущённость в эти периоды смещена в область крупных масштабов, либо о недостаточном пространственном разрешении исходных данных Madrigal для описания мелкомасштабной части спектра ионосферных неоднородностей, либо о нарушении гипотезы стационарности невязок TEC, что также

может приводить к завышенным оценкам корреляционного масштаба. Отметим, что данный вопрос требует отдельного исследования и будет рассмотрен в следующих работах.

Анализ анизотропного случая представляет не меньший интерес, так как позволяет судить о характерных корреляционных масштабах распределения ТЕС в регионе вдоль заданных направлений. Отметим, что в F2-слое ионосферы, который и даёт основной вклад в анализируемый в настоящей работе ТЕС, всегда присутствуют выделенные направления. К ним в первую очередь следует отнести направление геомагнитного поля Земли, определяющего движение заряженных частиц плазмы и направление нейтрального ветра на ионосферных высотах, выполняющего функцию фильтрации перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) (Tolstikov et al., 2022). В связи с этим в настоящей работе для построения направленных вариограмм использовались геомагнитные координаты, а в качестве исходных данных были взяты пары точек, вектор смещения которых попадает в рассматриваемый сектор направлений (шириной 15°). Сама вариограмма рассчитывалась согласно выражению (1). Отметим, что при таком подходе направления смещений, например север-юг и юг-север, оказываются неразличимы. Кроме того, по сравнению с изотропным случаем, существенно сокращается объём данных, на которых строится эмпирическая направленная вариограмма, что для некоторых направлений может приводить к недостоверным оценкам, особенно на больших расстояниях. В связи с этим эмпирические направленные вариограммы строились в настоящей работе только до максимального расстояния в 3500 км, что несколько меньше максимальных оцениваемых значений корреляционного масштаба в изотропном случае, представленных на *рис. 4*. Таким образом для всего исследуемого периода были получены вариограммы для каждого направления с шагом 15° , которые образуют вариограммную поверхность. Корреляционный масштаб вдоль выбранного направления может быть оценён как расстояние, на котором значение на вариограммной поверхности увеличивается в $\sqrt{3}/e \approx 0,64$ раз, где e — число Эйлера, относительно её нормированного значения. В настоящей работе проведён анализ усреднённых за весь период исследования вариограммных поверхностей для утренних (03:00–09:00 UT), дневных (09:00–15:00 UT), вечерних (15:00–21:00 UT) и ночных (21:00–03:00 UT) часов, они представлены на *рис. 6* (см. с. 393).

Графики представлены в геомагнитных координатах, где 0 соответствует направлению на геомагнитный север. Направление нейтрального ветра рассчитано по модели HWM-14 (*англ.* Horizontal Wind Model) (Drob et al., 2015) и приведено в условных единицах, так что максимально удалённый от центра квадрат показывает максимальный модуль скорости ветра. Усреднение ветра было сделано для каждого узла сетки за весь исследуемый период.

Полученные результаты в целом согласуются с представленными в работе (Forsythe et al., 2020), где показано, что зональная и меридиональная компоненты корреляционного масштаба могут изменяться в широких пределах (до значений больше 50° длины дуги большого круга) и могут претерпевать резкие изменения как по пространству, так и по магнитному локальному времени.

Днём корреляционный масштаб увеличен в зональном направлении и уменьшен в меридиональном, т.е. ионосферные структуры в основном вытянуты вдоль горизонтальной составляющей магнитного поля, некоторые отклонения могут быть связаны с влиянием нейтрального ветра. При этом необходимо отметить, что расположение приёмников на Европейском континенте также имеет выделенное направление с юго-запада на северо-восток, которое тоже может оказывать влияние на получаемые оценки анизотропии корреляционного масштаба.

Ночью значения полувариаций возрастают, при этом значения корреляционного масштаба становятся меньше. В отличие от дневных условий, когда ионизация солнечным излучением, зависящая от зенитного угла Солнца, становится доминирующим фактором, определяющим большие значения корреляционного масштаба, ночью, при отсутствии такого глобального фактора, большую роль играют мелкомасштабные неоднородности и турбулентность, что уменьшает корреляционный масштаб. Таким образом, при усреднении полувариаций на масштабе, большем чем масштаб неоднородностей, они не оказывают значимого влияния на форму вариограммной поверхности. Об этом также свидетельствует возросший

эффект свободной дисперсии, который для утра, дня и вечера варьируется в пределах $0,2-0,3 \text{ TECu}^2$, а для ночи составляет $0,65 \text{ TECu}^2$. Ночью также усиливается вклад неоднородностей субавроральной и авроральной областей, что вероятно может оказывать большее влияние на анизотропию корреляционного масштаба, чем нейтральный ветер.

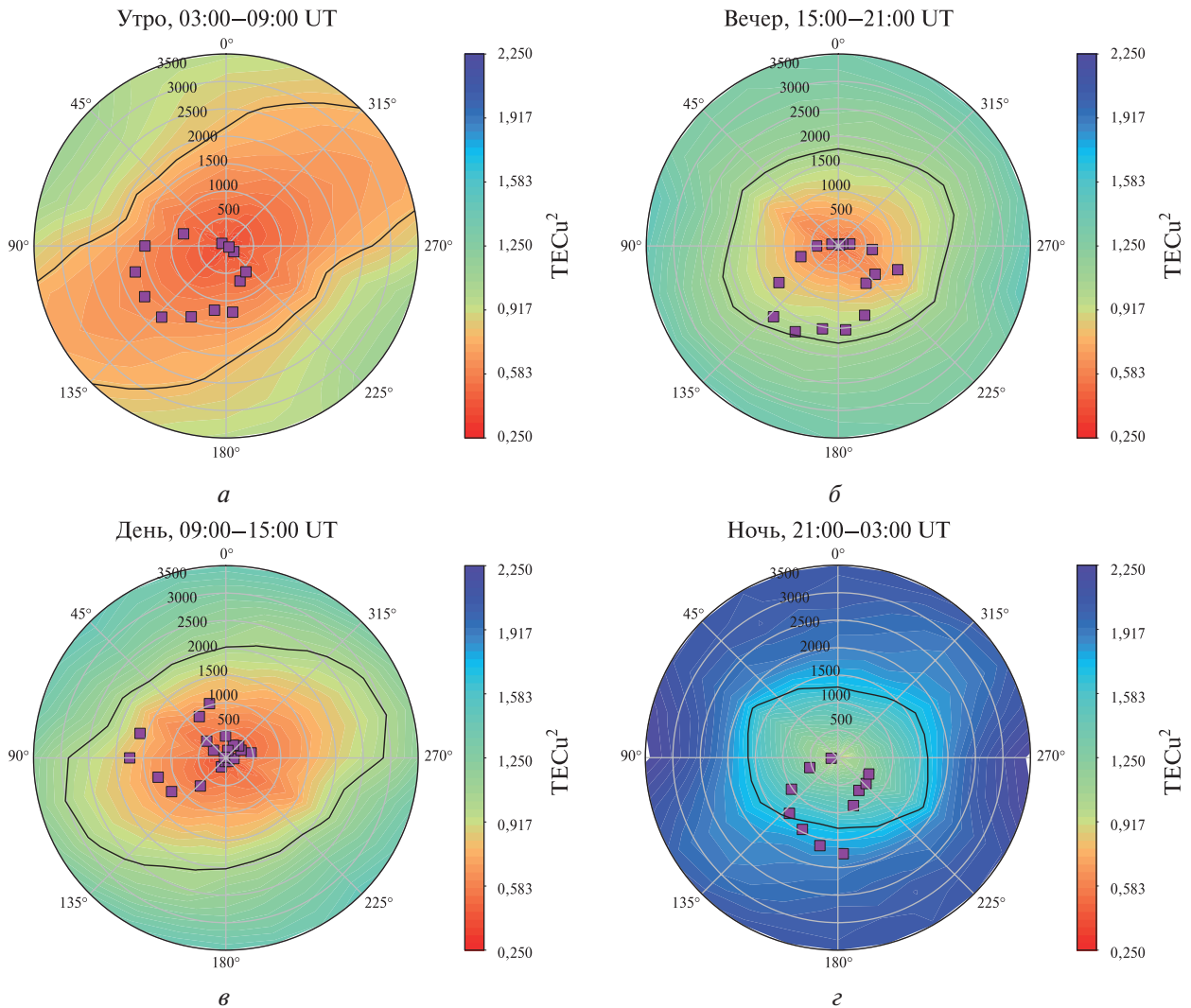


Рис. 6. Усреднённые вариограммные поверхности невязок ТЕС для утра (а), дня (в), вечера (б) и ночи (г). Чёрным цветом отмечен оцениваемый уровень корреляционного масштаба, пурпурным цветом показано направление нейтрального ветра

Утром характер анизотропии изменяется, вклад зональной компоненты увеличивается, при этом в нескольких направлениях значения превышают 3500 км, меридиональная остаётся примерно на том же уровне. При прохождении терминатора формируются неоднородности, вытянутые вдоль магнитного поля. Отклонение в направлении юго-запад и северо-восток связано с взаимодействием плазмы с нейтральным ветром, который эффективно фильтрует возможные направления распространения ПИВ, источником которых представляются акустико-гравитационные волны. Вечером степень анизотропии уменьшается, на фоне уменьшения зональной компоненты корреляционного масштаба меридиональная компонента становится более выраженной. В целом это достаточно хорошо согласуется со статистикой наблюдения крупномасштабных ПИВ в Европе, представленной в работе (Segarra et al., 2025), где показано, что в утренние часы ПИВ распространяются в зональном направлении, а в вечерние часы имеют в основном меридиональное направление распространения.

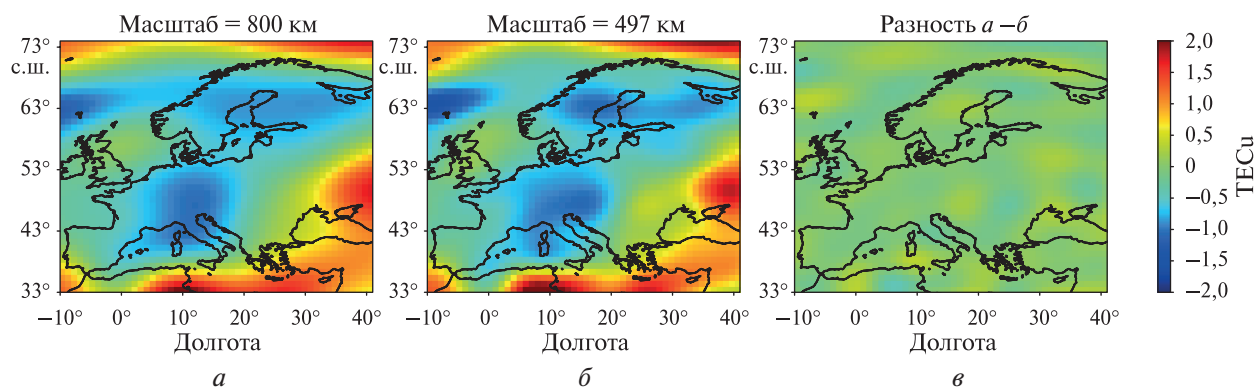


Рис. 7. Пример интерполяции невязок ТЕС для разного корреляционного масштаба: *a* — 800 км; *б* — 497 км; *в* — разность *a* и *б*

Корреляционный масштаб имеет большое значение в различных методах пространственной интерполяции и ассимиляции данных. Продемонстрируем это на примере построения региональной карты распределения ТЕС в Европе. На рис. 7 приведён пример интерполяции методом ординарного кригинга невязок вертикального ТЕС для данных Madrigal, представленных на рис. 1. Во всех случаях использовалась гауссова модель вариограммы, однако для распределения, представленного на рис. 7а, использовалось значение корреляционного масштаба 800 км, наиболее часто встречающееся в литературе при описании ТЕС, а на рис. 7б — определённое нами на основе данных наблюдений с применением вариограммного подхода значение 497 км. На рис. 7в показана разность результатов интерполяции при этих значениях корреляционных масштабов. При сравнении видно, что меньший радиус обеспечивает более детальное воспроизведение локальных структур в невязках, подчёркивая более резкие границы и мелкомасштабные особенности, тогда как больший радиус сглаживает мелкомасштабные изменения, создавая более однородную картину, что полезно для отображения глобальных структур. Таким образом корректное определение корреляционного масштаба позволяет повысить разрешение получаемого регионального распределения, что важно для многих практических приложений.

Заключение

В настоящей работе проведён анализ пространственных корреляционных масштабов остатков вертикального полного электронного содержания ТЕС в среднеширотной ионосфере Европейского региона с использованием вариографии. Исследование основано на данных за 2018 г., характеризующихся низкой солнечной и геомагнитной активностью, что позволило изучить особенности слабовозмущённой ионосферы. Показано, что корреляционный масштаб демонстрирует выраженный сезонный ход, увеличиваясь с 1000 км зимой до 2000–4000 км летом, что согласуется с сезонными вариациями REС. Выявлена зависимость корреляционного масштаба от направления с преобладанием зональной компоненты днём и усилением эффекта мелкомасштабных неоднородностей ночью. Анизотропия корреляционного масштаба связана с влиянием магнитного поля, нейтрального ветра и эффекта терминатора.

Полученные результаты имеют практическое значение для задач ассимиляции ионосферных данных, улучшения моделей прогнозирования (например, в алгоритмах, использующих фильтр Калмана и кригинг-интерполяцию), а также для понимания динамики ионосферных процессов в средних широтах. В будущих исследованиях целесообразно расширить анализ на периоды высокой солнечной активности и включить дополнительные факторы, такие как геомагнитные возмущения и мелкомасштабные волновые процессы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН.

Литература

1. *Bilitza D., Altadill D., Truhlik V. et al.* International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // *Space Weather*. 2017. V. 15. No. 2. P. 418–429. DOI: 10.1002/2016SW001593.
2. *Bust G. S., Immel T. J.* IDA4D: Ionospheric data assimilation for the ICON mission // *Space Science Reviews*. 2020. V. 216. No. 3. Article 33. 17 p. DOI: 10.1007/s11214-020-00648-z.
3. *Bust G. S., Garner T. W., Gaussiran T. L., II.* Ionospheric Data Assimilation Three-Dimensional (IDA3D): A global, multisensor, electron density specification algorithm // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2004. V. 109. No. A11. Article A11312. DOI: 10.1029/2003JA010234.
4. *Drob D. P., Emmert J. T., Meriwether J. W. et al.* An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere // *Earth and Space Science*. 2015. V. 2. No. 7. P. 301–319. DOI: 10.1002/2014EA000089.
5. *Forsythe V. V., Azeem I., Crowley G.* Ionospheric horizontal correlation distances: Estimation, analysis, and implications for ionospheric data assimilation // *Radio Science*. 2020. V. 55. No. 12. Article e2020RS007159. 14 p. DOI: 10.1029/2020RS007159.
6. *Juan J. M., Sanz J., Rovira-Garcia A. et al.* AATR an ionospheric activity indicator specifically based on GNSS measurements // *J. Space Weather and Space Climate*. 2018. V. 8. Article A14. DOI: 10.1051/swsc/2017044.
7. *Liu A., Li Z., Wang N. et al.* Gaussian variogram-based model of total electron content in the regional ionosphere of China // *Space Weather*. 2024. V. 22. No. 11. Article e2024SW004047. DOI: 10.1029/2024SW004047.
8. *Ly M., Tang Q., Qiao J. et al.* Statistical analysis of ionospheric correlation for shortwave system // *Radio Science*. 2024. V. 59. No. 4. Article e2023RS007893. 12 p. DOI: 10.1029/2023RS007893.
9. *Lyu H., Hernández-Pajares M., Li M. et al.* Global 3D ionospheric shape function modeling with kriging // *J. Geodesy*. 2024. V. 98. No. 12. Article 104. DOI: 10.1007/s00190-024-01908-4.
10. *Mannucci A. J., Wilson B. D., Yuan D. N. et al.* A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements // *Radio Science*. 1998. V. 33. No. 3. P. 565–582. DOI: 10.1029/97RS02707.
11. *Nava B., Coisson P., Radicella S. M.* A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2008. V. 70. No. 15. P. 1856–1862. DOI: 10.1016/j.jastp.2008.01.015.
12. *Oliver M. A., Webster R.* A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging // *Catena*. 2014. V. 113. P. 56–69. DOI: 10.1016/j.catena.2013.09.006.
13. *Papitashvili N. E., King J. H.* OMNI hourly data set. Heliophysics Digital Resource Library (HDRL) dataset, 2020. DOI: 10.48322/1SHR-HT18.
14. *Pignatelli A., Pezzopane M., Rizzi R., Galkin I.* Effective solar indices for ionospheric modeling: A review and a proposal for a real-time regional IRI // *Surveys in Geophysics*. 2018. V. 39. No. 1. P. 125–167. DOI: 10.1007/s10712-017-9438-y.
15. *Qiao J., Liu Y., Fan Z. et al.* Ionospheric TEC data assimilation based on Gauss–Markov Kalman filter // *Advances in Space Research*. 2021. V. 68. No. 10. P. 4189–4204. DOI: 10.1016/j.asr.2021.08.004.
16. *Reid B., Themens D. R., McCaffre A. et al.* A-CHAIM: Near-real-time data assimilation of the high latitude ionosphere with a pArticle filter // *Space Weather*. 2023. V. 21. No. 3. Article e2022SW003185. DOI: 10.1029/2022SW003185.
17. *Rideout W., Coster A.* Automated GPS processing for global total electron content data // *GPS Solutions*. 2006. V. 10. No. 3. P. 219–228. DOI: 10.1007/s10291-006-0029-5.
18. *Segarra A., Altadill D., de Paula V., Navas-Portella V.* Climatology of large-scale Traveling Ionospheric Disturbances above Europe during the 2014–2023 period // *J. Space Weather and Space Climate*. 2025. V. 15. Article 28. DOI: 10.1051/swsc/2025024.
19. *Shim J. S., Scherliess L., Schunk R. W., Thompson D. C.* Spatial correlations of day-to-day ionospheric total electron content variability obtained from ground-based GPS // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2008. V. 113. No. A9. Article A09309. DOI: 10.1029/2007JA012635.
20. *Tang J., Zhang S., Huo X., Wu X.* Ionospheric assimilation of GNSS TEC into IRI model using a local ensemble Kalman filter // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 14. Article 3267. DOI: 10.3390/rs14143267.
21. *Tolstikov M. V., Oinats A. V., Artamonov M. F. et al.* Statistical relation of traveling ionospheric disturbances with neutral wind and disturbances in the stratosphere // *Solar-Terrestrial Physics*. 2022. V. 8. No. 4. P. 78–88. DOI: 10.12737/szf-84202208.
22. *Yasyukevich Y. V., Zatulokin D., Padokhin A. et al.* Klobuchar, NeQuickG, BDGIM, GLONASS, IRI-2016, IRI-2012, IRI-Plas, NeQuick2, and GEMTEC ionospheric models: A comparison in total electron content and positioning domains // *Sensors*. 2023. V. 23. No. 10. Article 4773. DOI: 10.3390/s23104773.

23. Yuan L., Hoque M. M., Kodikara T. The four-dimensional variational Neustrelitz Electron Density Assimilation Model: NEDAM // *Space Weather*. 2023. V. 21. No. 6. Article e2022SW003378. DOI: 10.1029/2022SW003378.

Estimation of the total electron content distribution correlation scale in the European region using a variogram approach based on GNSS radio sounding data

I. A. Pavlov, A. M. Padokhin

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere
and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Moscow 108840, Russia
E-mail: ipavlov@izmiran.ru*

Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

The paper presents a method for estimating the correlation scale of the ionospheric Total Electron Content (TEC) distribution using Global Navigation Satellite System (GNSS) radio sounding data. The method uses data obtained from the Madrigal database to construct empirical variograms of TEC residuals relative to the 27-day median distribution of electron density. The correlation scale was determined by fitting the parameters of a Gaussian variogram model to best match the obtained empirical variograms. Analysis of data from 2018, a year characterized by low solar and geomagnetic activity, showed that in the European region, the TEC correlation scale exhibits seasonal variability, increasing from ~1000 km in winter months to 2000–4000 km in summer, which agrees well with the variability of the Regional Electron Content (REC). From analysis of variogram surfaces, a significant anisotropy of the TEC correlation scale was revealed associated with the directions of magnetic field and neutral wind at the F2 layer peak altitudes. The research results have practical significance for the tasks of adapting ionospheric models and assimilating TEC data for the purpose of forecasting radio wave propagation conditions, as well as for understanding the dynamics of ionospheric processes at midlatitudes.

Keywords: ionosphere, GNSS, correlation scale, variogram

Accepted: 10.02.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-385-397

References

1. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V. et al., International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions, *Space Weather*, 2017, V. 15. No. 2, pp. 418–429, DOI: 10.1002/2016SW001593.
2. Bust G. S., Immel T. J., IDA4D: Ionospheric data assimilation for the ICON mission, *Space Science Reviews*, 2020, V. 216, No. 3, Article 33, 17 p., DOI: 10.1007/s11214-020-00648-z.
3. Bust G. S., Garner T. W., Gaussiran T. L., II, Ionospheric Data Assimilation Three-Dimensional (IDA3D): A global, multisensor, electron density specification algorithm, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2004, V. 109, No. A11, Article A11312, DOI: 10.1029/2003JA010234.
4. Drob D. P., Emmert J. T., Meriwether J. W. et al., An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere, *Earth and Space Science*, 2015, V. 2, No. 7, pp. 301–319, DOI: 10.1002/2014EA000089.
5. Forsythe V. V., Azeem I., Crowley G., Ionospheric horizontal correlation distances: Estimation, analysis, and implications for ionospheric data assimilation, *Radio Science*, 2020, V. 55, No. 12, Article e2020RS007159, 14 p., DOI: 10.1029/2020RS007159.
6. Juan J. M., Sanz J., Rovira-Garcia A. et al., AATR an ionospheric activity indicator specifically based on GNSS measurements, *J. Space Weather and Space Climate*, 2018, V. 8, Article A14, DOI: 10.1051/swsc/2017044.

7. Liu A., Li Z., Wang N. et al., Gaussian variogram-based model of total electron content in the regional ionosphere of China, *Space Weather*, 2024, V. 22, No. 11, Article e2024SW004047, DOI: 10.1029/2024SW004047.
8. Lv M., Tang Q., Qiao J. et al., Statistical analysis of ionospheric correlation for shortwave system, *Radio Science*, 2024, V. 59, No. 4, Article e2023RS007893, 12 p., DOI: 10.1029/2023RS007893.
9. Lyu H., Hernández-Pajares M., Li M. et al., Global 3D ionospheric shape function modeling with kriging, *J. Geodesy*, 2024, V. 98, No. 12, Article 104, DOI: 10.1007/s00190-024-01908-4.
10. Mannucci A. J., Wilson B. D., Yuan D. N. et al., A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements, *Radio Science*, 1998, V. 33, No. 3, pp. 565–582, DOI: 10.1029/97RS02707.
11. Nava B., Coisson P., Radicella S. M., A new version of the NeQuick ionosphere electron density model, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, V. 70, No. 15, pp. 1856–1862, DOI: 10.1016/j.jastp.2008.01.015.
12. Oliver M. A., Webster R., A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging, *Catena*, 2014, V. 113, pp. 56–69, DOI: 10.1016/j.catena.2013.09.006.
13. Papitashvili N. E., King J. H., *OMNI hourly data set*, Heliophysics Digital Resource Library (HDRL) dataset, 2020, DOI: 10.48322/1SHR-HT18.
14. Pignalberi A., Pezzopane M., Rizzi R., Galkin I., Effective solar indices for ionospheric modeling: A review and a proposal for a real-time regional IRI, *Surveys in Geophysics*, 2018, V. 39, No. 1, pp. 125–167, DOI: 10.1007/s10712-017-9438-y.
15. Qiao J., Liu Y., Fan Z. et al., Ionospheric TEC data assimilation based on Gauss–Markov Kalman filter, *Advances in Space Research*, 2021, V. 68, No. 10, pp. 4189–4204, DOI: 10.1016/j.asr.2021.08.004.
16. Reid B., Themens D. R., McCaffre A. et al., A-CHAIM: Near-real-time data assimilation of the high latitude ionosphere with a pArticle filter, *Space Weather*, 2023, V. 21, No. 3, Article e2022SW003185, DOI: 10.1029/2022SW003185.
17. Rideout W., Coster A., Automated GPS processing for global total electron content data, *GPS Solutions*, 2006, V. 10, No. 3, pp. 219–228, DOI: 10.1007/s10291-006-0029-5.
18. Segarra A., Altadill D., de Paula V., Navas-Portella V., Climatology of large-scale Traveling Ionospheric Disturbances above Europe during the 2014–2023 period, *J. Space Weather and Space Climate*, 2025, V. 15, Article 28, DOI: 10.1051/swsc/2025024.
19. Shim J. S., Scherliess L., Schunk R. W., Thompson D. C., Spatial correlations of day-to-day ionospheric total electron content variability obtained from ground-based GPS, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2008, V. 113, No. A9, Article A09309, DOI: 10.1029/2007JA012635.
20. Tang J., Zhang S., Huo X., Wu X., Ionospheric assimilation of GNSS TEC into IRI model using a local ensemble Kalman filter, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 14, Article 3267, DOI: 10.3390/rs14143267.
21. Tolstikov M. V., Oinats A. V., Artamonov M. F. et al., Statistical relation of traveling ionospheric disturbances with neutral wind and disturbances in the stratosphere, *Solar-Terrestrial Physics*, 2022, V. 8, No. 4, pp. 78–88, DOI: 10.12737/szf-84202208.
22. Yasyukevich Y. V., Zatolokin D., Padokhin A. et al., Klobuchar, NeQuickG, BDGIM, GLONASS, IRI-2016, IRI-2012, IRI-Plas, NeQuick2, and GEMTEC ionospheric models: A comparison in total electron content and positioning domains, *Sensors*, 2023, V. 23, No. 10, Article 4773, DOI: 10.3390/s23104773.
23. Yuan L., Hoque M. M., Kodikara T., The four-dimensional variational Neustrelitz Electron Density Assimilation Model: NEDAM, *Space Weather*, 2023, V. 21, No. 6, Article e2022SW003378, DOI: 10.1029/2022SW003378.