

Использование сигналов геостационарных спутников системы COMPASS/BeiDou для оценки ионосферных эффектов геомагнитных бурь и внезапных стратосферных потеплений

Г. А. Курбатов¹, Е. А. Козловцева¹, А. С. Ясюкевич², Ю. В. Ясюкевич^{2,*}, А. М. Падохин^{1,†}

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики атмосферы
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Институт солнечно-земной физики СО РАН
Россия, 664033, Иркутск,
ул. Лермонтова 126-а, а/я 291

(Статья поступила 05.07.2017; Подписана в печать 06.07.2017)

В работе на примере сильной (G3) геомагнитной бури конца мая 2017 г. и внезапных стратосферных потеплений зимы 2015–2016 гг. продемонстрирована возможность использования сигналов геостационарных спутников китайской навигационной системы COMPASS/BeiDou для исследований ионосферной изменчивости, обусловленной различными геомагнитными и метеорологическими возмущающими факторами.

PACS: 94.20.Vv

УДК: 537.874

Ключевые слова: глобальные спутниковые навигационные системы, COMPASS/BeiDou, ионосфера, радиопросвечивание, геомагнитные бури, внезапные стратосферные потепления.

ВВЕДЕНИЕ

В ионосфере Земли протекают сложные физические процессы, обуславливающие сильную изменчивость параметров ионосферной плазмы на различных пространственно-временных масштабах. К основным внешним источникам изменчивости ионосферы ото дня ко дню относятся потоки ионизирующего солнечного излучения в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах длин волн, процессы взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли, а также процессы, протекающие в нижней атмосфере. Большую часть ионосферной изменчивости можно объяснить такими мощными и достаточно хорошо изученными механизмами, как поток солнечного излучения и геомагнитная активность. Тем не менее, как показали недавние исследования [1], значительная часть ионосферной изменчивости (вплоть до 20%) может быть связана с процессами в нижней атмосфере (сильные метеорологические штормы, тропические циклоны и ураганы, внезапные стратосферные потепления), что сопоставимо со средней изменчивостью вызванной геомагнитными факторами [2]. Таким образом, исследования взаимосвязей и взаимодействий в системе тропосфера–стратосфера–мезосфера–термосфера–ионосфера имеет большое значение для прогнозирования состояния ионосферной плазмы и понимания физики протекающих в ней процессов.

Среди метеорологических факторов, оказывающих воздействие на ионосферу, особую роль играют внезапные стратосферные потепления (ВСП), которые пред-

ставляют собой наиболее сильные явления в высокоширотной стратосфере, преимущественно северного полушария, происходящие достаточно регулярно в зимний сезон, что позволяет на их примере исследовать связи средней атмосферы с ионосферой и ее влияние на последнюю. В связи с этим в последнее время проведено большое число исследований ионосферных эффектов ВСП с использованием различных методов зондирования (измерения ионозондов, радаров некогерентного рассеяния, GNSS–зондирование), позволивших установить основные закономерности воздействия ВСП на ионосферу, смотри например [3] и ссылки внутри. Тем не менее, каждое подобное событие является уникальным, что обуславливает необходимость продолжения исследований, как в плане накопления экспериментальных данных, так и в плане развития методов диагностики ионосферных возмущений, вызванных ВСП.

Одним из наиболее развитых, удобных и широко используемых методов исследования ионосферных возмущений различной природы и пространственно-временных масштабов является метод радиопросвечивания ионосферы сигналами глобальных навигационных спутниковых систем GNSS [4]. При этом в основном используются сигналы среднеорбитальных спутников российской системы ГЛОНАСС и американской системы GPS. Вместе с тем в последнее время в мире идет бурное развитие систем GNSS, активно пополняется орбитальная группировка европейской системы Galileo, выведены на орбиту и функционируют аппараты японской квазизенитной навигационной системы QZSS, функционируют геостационарные спутники систем дифференциальной коррекции SBAS, что предоставляет дополнительные возможности для исследования ионосферы методами радиопросвечивания [5]. Отдельно в данном ряду стоит китай-

*E-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

†E-mail: padokhin@physics.msu.ru

ская навигационная система COMPASS/BeiDou, отличительной чертой которой является наличие в составе ее орбитальной группировки геостационарных навигационных спутников, которые, в случае использования для ионосферного зондирования, обладают преимуществом практически неподвижной подионосферной точки (по сравнению с движущейся подионосферной точкой спутников GPS/ГЛОНАСС) [6]. Это открывает возможность использовать сигналы данных спутников для непрерывного мониторинга параметров ионосферы, прежде всего полного электронного содержания (ТЕС), вдоль заданного направления спутник — приемник. Более того, как показали недавние исследования [6], оценки ТЕС по данным геостационарных спутников COMPASS/BeiDou обладают наилучшими шумовыми характеристиками среди всех доступных в настоящее время геостационарных спутников систем GNSS и SBAS. Таким образом, их использование является предпочтительным. Особенно информативными должны быть данные наблюдения в приэкваториальных широтах, где углы возвышения геостационарных спутников близки к максимальным.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является демонстрация возможности использования сигналов геостационарных спутников навигационной системы COMPASS/BeiDou для радиопросвечивания ионосферы в периоды геомагнитных возмущений и ВСП, а также анализ межсуточной изменчивости ТЕС в ионосфере средних и приэкваториальных широт в периоды геомагнитных бурь и ВСП. В связи с тем, что сигналы геостационарных спутников системы COMPASS/BeiDou были доступны, начиная с 2012 г., а приемное оборудование наземных станций, способное работать с данными сигналами, стало широкодоступным в сети IGS-MGEX с 2015 г., настоящая работа фактически представляет собой исследование отдельных событий последних трех лет.

1. ОЦЕНКА ТЕС ПО ДАННЫМ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ СИГНАЛАМИ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ COMPASS/BEIDOU

Используя наблюдения на двух когерентных рабочих частотах GNSS, можно составить линейные комбинации уравнений наблюдения так, чтобы выделить вклад различных областей атмосферы в наблюдаемую задержку. Исходя из этих соображений, определяется, в частности, полное электронное содержание ТЕС — число электронов в столбе единичного сечения вдоль луча спутник–приемник [4]:

$$TEC = \int_l n_e(\mathbf{r})dl = \left(\frac{L_i}{f_i} - \frac{L_j}{f_j} \right) \frac{f_i^2 f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \frac{c}{K} + \text{const}, \tag{1}$$

$$TEC = \int_l n_e(\mathbf{r})dl = \frac{P_j - P_i}{\left(\frac{1}{f_j^2} - \frac{1}{f_i^2} \right) K}, \tag{2}$$

где (L_i, L_j) и (P_i, P_j) — измерения фазы и псевдодальности на любой паре когерентных рабочих частотах (f_i, f_j) системы (для COMPASS/BeiDou L_1 — 1561.098 МГц, L_2 — 1589.742 МГц, L_6 — 1268.52 МГц, L_7 — 1207.14 МГц, соответственно), $K = 40.308 \text{ м}^3/\text{с}^2$, $c = 3 \times 10^8 \text{ м/с}$ — скорость света в вакууме, $n_e(\mathbf{r})$ — распределение электронной концентрации в ионосфере, а интеграл берется вдоль луча спутник–приемник. Отметим, что ТЕС, определяемое по фазовым данным (1), является относительным, так как содержит неизвестную аддитивную константу из-за неизвестной начальной фазы в момент наблюдения. Тем не менее, для ионосферных исследований, в которых существенную роль играют вариации ТЕС, предпочтительно использовать именно фазовые данные, так как ТЕС, оцененный по данным измерения псевдодальностей (2) обладает на порядок более высоким уровнем шума [7].

В настоящий момент спутниковая группировка системы COMPASS/BeiDou пребывает в стадии развертывания и насчитывает 20 спутников, 5 из которых находятся на геостационарных орбитах, данные о них приведены в табл. 1. Хорошо видно, что все эти аппараты расположены в восточном полушарии, поэтому сигналы этих спутников способны принимать лишь ограниченное число приемников сети IGS-MGEX, расположенных в средних и низких широтах восточного полушария, преимущественно в юго-восточной Азии, северной части Австралии. Отметим, что в более высоких широтах северного и южного полушарий прием сигналов геостационарных спутников также возможен, но затруднен в связи с их небольшим возвышением над горизонтом. Так, например, угол возвышения спутника Compass-G5 для приемного пункта, расположенного в Москве, составит 25°. В случае малых углов возвышения в данных наблюдаются частые срывы сопровождения фазы или периоды полного отсутствия данных.

Таблица 1: Геостационарные спутники системы COMPASS/BeiDou

Название спутника	Код	Долгота
Compass-G1	C01	140° в.д.
Compass-G3	C03	110.5° в.д.
Compass-G4	C04	160° в.д.
Compass-G5	C05	58.75° в.д.
Compass-G6	C02	80° в.д.

С точки зрения использования в методе радиопросвечивания, геостационарные спутники обладают преимуществом по сравнению с среднеорбитальными спутниками GPS/ГЛОНАСС за счет практически непо-

движной подионосферной точки. Это дает возможность анализировать длинные непрерывные ряды наблюдений для выбранной пары спутник–приемник, в отличие от коротких 2–6 ч. записей в случае GPS/ГЛОНАСС наблюдений. Тем не менее, низкие углы возвышения геостационарных спутников уже в средних широтах требуют учета пространственных градиентов электронной концентрации при анализе полученных данных [5, 6].

Далее продемонстрируем возможности использования геостационарных измерений ТЕС по данным COMPASS/BeiDou для анализа ионосферных эффектов на примере сильной (G3) геомагнитной бури 28.05.2017 г. и двух событий ВСП зимы 2015–2016 гг. — слабого ВСП в феврале и финального сильного ВСП в марте 2016 г.

2. ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 28 МАЯ 2017 г. ПО ДАННЫМ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ COMPASS/BEIDOU

Для анализа изменчивости ТЕС по данным приема сигналов геостационарных спутников COMPASS/BeiDou во время рассматриваемой бури использовались данные трех приемных пунктов сети IGS-MGEX [8]: среднеширотной станции JFNG (30.52° с. ш., 114.49° в. д.) северного полушария, приэкваториальной станции KARR (20.98° ю. ш., 117.1° в. д.) южного полушария и экваториальной станции SIN1 (1.34° с. ш., 103.68° в. д.). Для оценки ТЕС использовались сигналы спутника Compass-G5. Геометрия проведения эксперимента показана на рис. 1,а. Анализировались данные за период 22 мая–5 июня 2017 г. На врезках рис. 1,б–г показано изменение геомагнитных индексов Kp и Dst в рассматриваемый период. Видно, что 28 мая (148-й день) в период максимального развития геомагнитной бури планетарный индекс Kp достигал значений 7 в 03:06 UT, в то же время индекс Dst достигал –122 нТл.

На рис. 1,б–г также в виде двумерных карт представлена изменчивость относительного наклонного ТЕС для каждой из рассматриваемых станций в координатах (день года, универсальное время). Отметим, что в период максимального развития геомагнитной бури в данных ТЕС со всех трех станций наблюдается положительная аномалия (положительная ионосферная буря), причем ее интенсивность падает в направлении геомагнитного экватора. При этом величина наблюдаемой аномалии ТЕС в южном полушарии практически в два раза выше, чем в северном и достигает значений ~ 30 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$). Таким образом, мы наблюдаем асимметрию в ионосферном отклике на геомагнитную бурю в северном и южном полушариях, вызванную сложной комбинацией процессов (меридиональные ветры, изменение состава нейтральной компоненты, проникновение магнитосферно-

го электрического поля), ответственных за возникновение положительных и отрицательных ионосферных возмущений [9, 10].

3. ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВСП ЗИМЫ 2015–2016 гг. ПО ДАННЫМ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ COMPASS/BEIDOU

В рассматриваемый зимний сезон наблюдалось два резких возрастания стратосферной температуры на уровне 10 мбар. над северным полюсом (черные кривые на рис. 3, данные реанализа MERRA2 [15]) в феврале (на ~ 70 K) и марте (на ~ 50 K) 2016 г. В это же время на тех же высотах для первого события (февраль) наблюдается ослабление скорости среднего зонального ветра (с ~ 70 м/с до ~ 10 м/с) без перемены его направления, в то время как для второго события (март) наблюдается резкое изменение скорости и направления среднего зонального ветра с западного (~ 50 м/с) на восточное (~ 30 м/с) на широте 60° с. ш. (розовые кривые на рис. 3, данные реанализа MERRA2) без последующего восстановления нормальной зимней циркуляции. Таким образом, первое событие является своего рода промежуточным между сильным и слабым потеплением, в то время как второе событие можно отнести к сильным финальным ВСП.

Геомагнитная обстановка в рассматриваемый период менялась от слабо до умеренно возмущенной. На рис. 2 представлены геомагнитные индексы Kp и Dst за январь–март 2016 г, хорошо отражающие этот факт. Отметим, что в период действия второго из рассматриваемых нами ВСП наблюдалась слабая (G2) геомагнитная буря, при этом возмущения магнитного поля наблюдались и в экваториальной области, индекс Dst достигал значений -100 нТл. Это говорит о том, что наблюдаемые в данный период вариации ТЕС, не могут быть однозначно связаны с воздействием ВСП, а являются откликом ионосферы на комбинацию возмущающих факторов сверху из ОКП и снизу из тропосферы и стратосферы.

Для анализа изменчивости ТЕС во время рассматриваемого ВСП по данным приема сигналов геостационарных спутников COMPASS/BeiDou использовались данные трех приемных пунктов сети IGS-MGEX [8]: двух среднеширотных станций DYNG (38.08° с. ш., 23.93° в. д.) и KZN2 (55.79° с. ш., 49.12° в. д.), и экваториальной станции SIN1 (1.34° с. ш., 103.68° в. д.). При этом, для оценки ТЕС на приемных пунктах KZN2, DYNG использовались сигналы спутника Compass-G5, в то время как для станции SIN1 использовался спутник Compass-G3. Геометрия проведения эксперимента показана на рис. 3,а.

Для каждой станции обрабатывался интервал с 1 января по 3 марта 2016 г. На рис. 3 представлены результаты данной обработки в виде двумерных карт изменчивости относительного наклонного ТЕС для каждой из станций в координатах (день года, универсальное

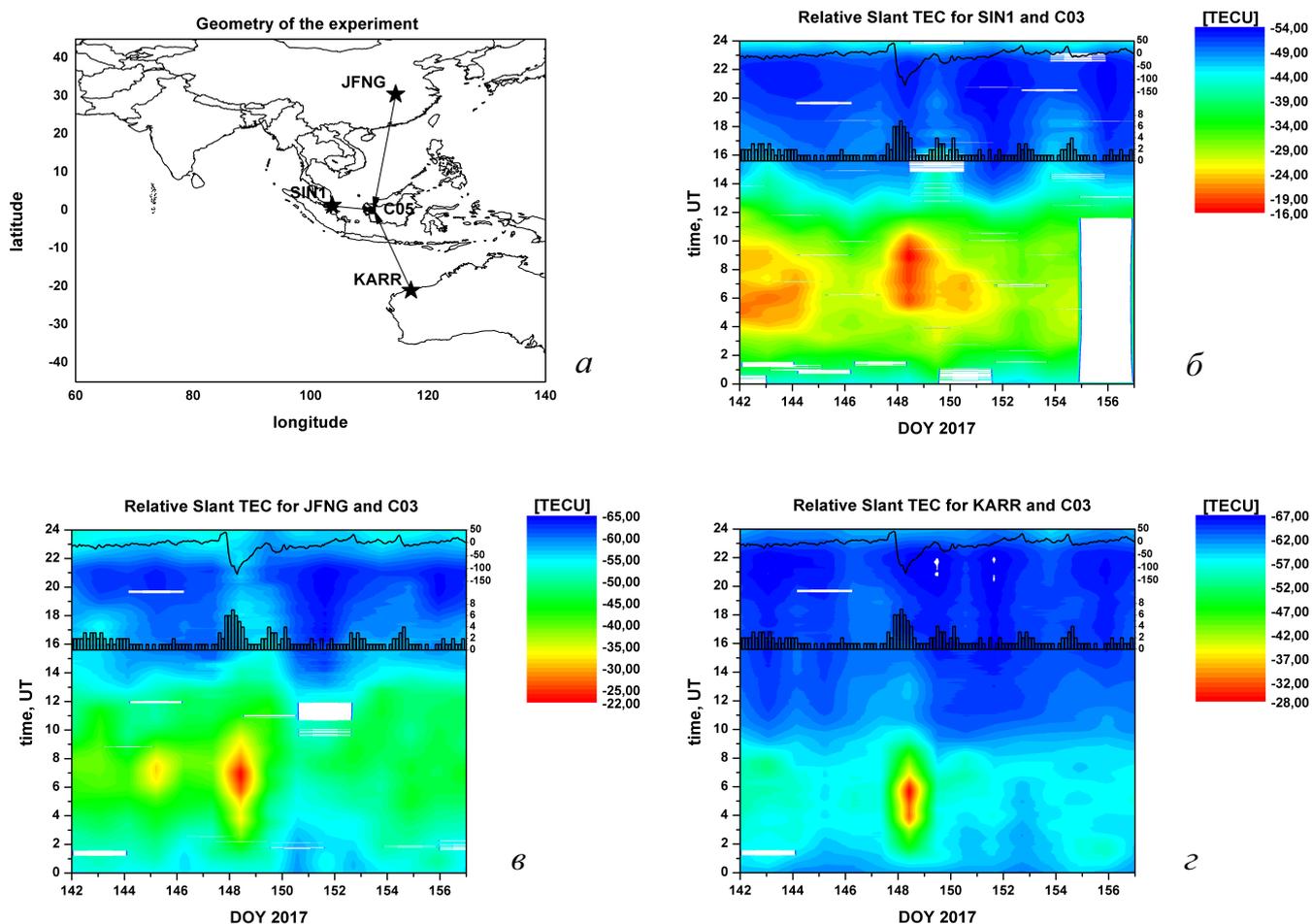


Рис. 1: Геометрия эксперимента — *a*, изменчивость относительного наклонного ТЕС — *б, в, г* — во время сильной (G3) геомагнитной бури 28.05.2017 по данным геостационарных спутников COMPASS/BeiDou и приемных пунктов SIN1(*б*), JFNG(*в*), KARR(*г*), совместно с геомагнитными индексами Kp и Dst

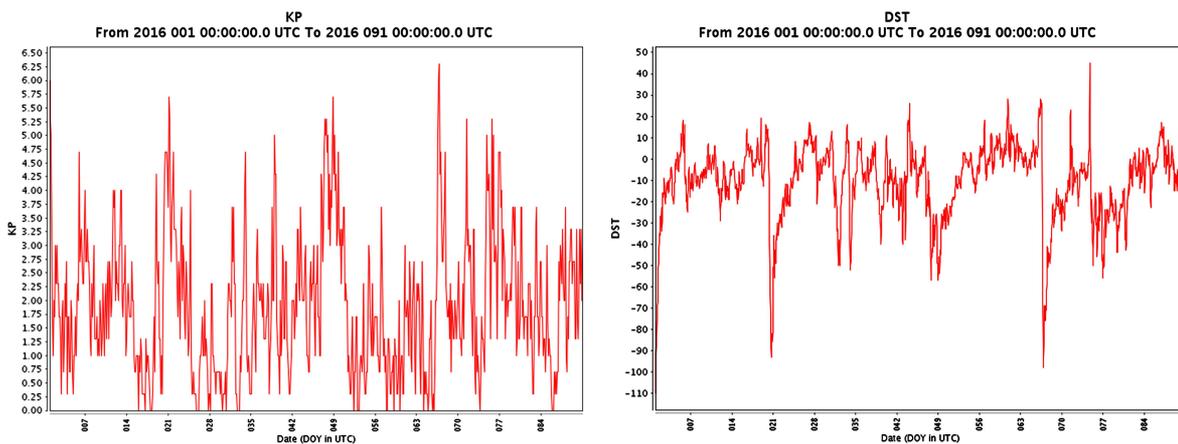


Рис. 2: Индексы Kp (слева) и Dst (справа) в период действия ВСП зимой 2015–2016 гг.

время), совместно с данными о стратосферной температуре на северном полюсе (черные кривые) и среднем зональном ветре на 60° с.ш. на уровне 10 мбар (ро-

зовые кривые). Отметим некоторые особенности полученных результатов. На всех графиках отчетливо проявляется суточных ход ТЕС с максимумом в по-

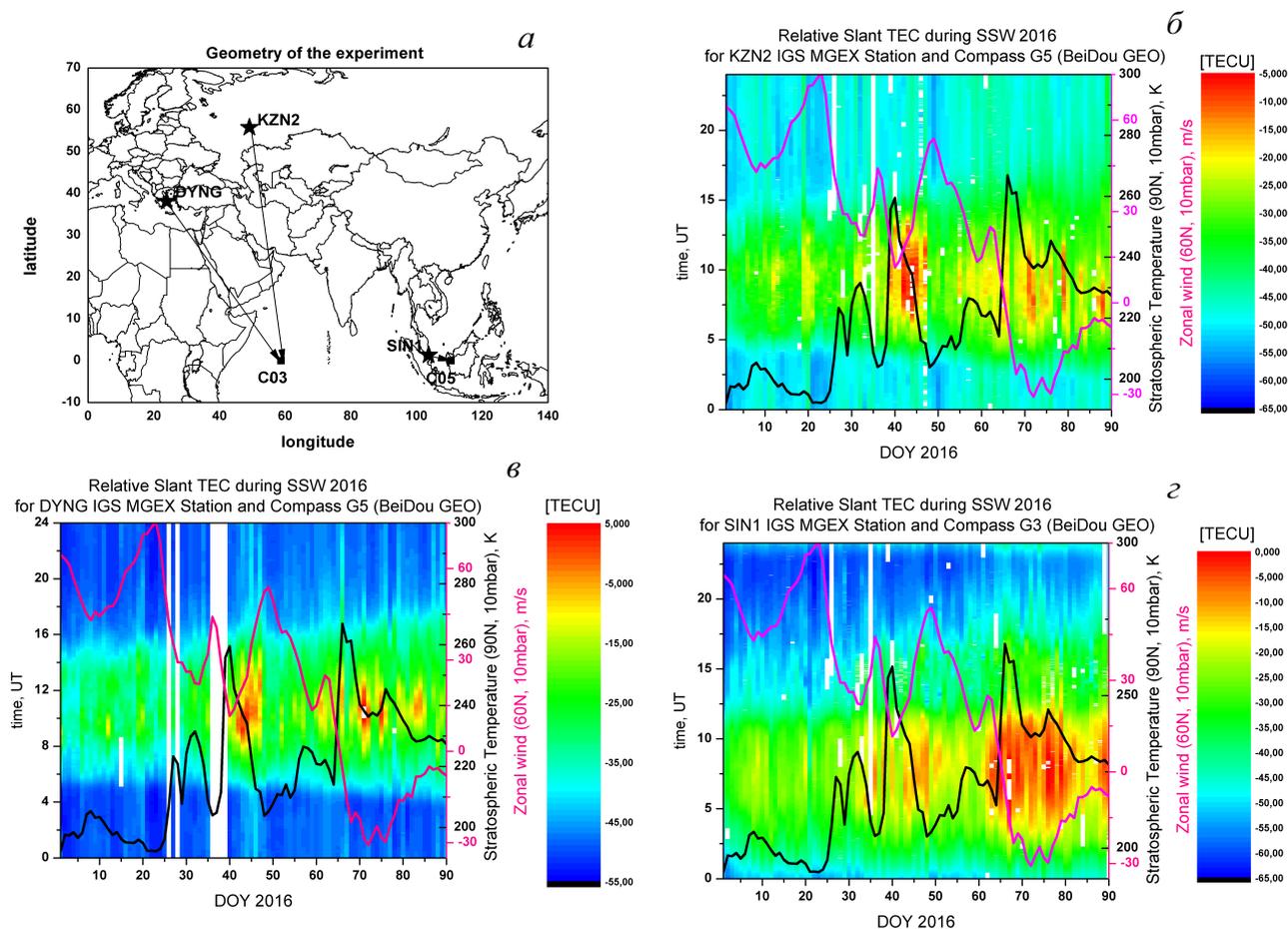


Рис. 3: Геометрия эксперимента — *a* и вариации относительного наклонного ТЕС во время действия ВСП зимы 2015–2016гг по данным геостационарных спутников COMPASS/BeiDou и приемных пунктов KZN2 — *б*, DYNG — *в*, SIN1 — *г*, совместно с вариациями стратосферной температуры (черные кривые) на северном полюсе и среднего зонального ветра (розовые кривые) на 60° с. ш.

луденные часы. Отметим, что так как станции расположены на разных долготах, а графики представлены в UT, наблюдается сдвиг положения дневного максимума для разных станций, наиболее ярко видный для пары станций DYNG и SIN1. Отметим, что для первого из рассматриваемых нами пиков ВСП в суточном ходе ТЕС развивается интенсивная ($\sim 10\text{--}15$ TECU) положительная аномалия в околополуденные часы, причем развитие ее происходит с задержкой на 1–2 дня относительно пика ВСП, причем сама аномалия наблюдается потом в течение недели.

Данный результат соответствует полученным в работах [11–14] данным для ВСП 2008–2009гг. Исходя из графиков может показаться, что амплитуда аномалии для данного события уменьшается в направлении полюса, что противоречит результатам [11–13], однако на них представлены результаты для наклонного ТЕС, таким образом, лучи для станций находящиеся на более высоких широтах, проходят больший путь в толще возмущенной ионосферы, эффективно увеличивая величину наблюдаемой аномалии.

Для второго из рассматриваемых пиков ВСП наблюдается более значительная положительная (до 20 TECU на станции SIN1) аномалия суточного хода ТЕС в околополуденные часы, причем интенсивность аномалии увеличивается в направлении экватора, даже с учетом наклона лучей, что является характерной особенностью ВСП. При этом отметить, что во время второго пика ВСП также наблюдались значительные геомагнитные возмущения в экваториальной области, что, безусловно, влияет на наблюдаемый характер вариаций. Однако стоит отметить, что для геомагнитных возмущений характерно уменьшение амплитуды ионосферного отклика по направлению к экватору [6], в то время как в нашем случае наблюдается обратная картина, как раз характерная для ВСП.

Кроме того, важной особенностью рассмотренных нами событий, является отсутствие в наблюдаемых рядах ТЕС интенсивной отрицательной аномалии в послеполуденные часы, и усиления полусуточной гармоники, о которых сообщали авторы предыдущих исследований [11–13] на примере сильного ВСП зимы 2008–

2009 гг. Возможно, это также связано с тем, что наше исследование проводилось в период умеренно возмущенных геомагнитных условий (в отдельные дни Кр индекс достигал значения 6), в то время как ВСП 2008–2009 гг, на данные о котором опираются работы [11–14], происходило в очень спокойных геомагнитных условиях (Кр ~ 2). Это говорит о том, что механизм взаимного воздействия геомагнитных и метеорологических факторов на изменчивость полного электронного содержания требует отдельного детального исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в работе результаты демонстрируют возможности и потенциал использования двухчастотных когерентных сигналов геостационарных спутников COMPASS/BeiDou для исследований изменчивости ТЕС в ионосфере на различных пространственно-

временных масштабах в спокойных и возмущенных гелиогеофизических условиях в качестве дополнения к ставшим уже традиционными GPS/ГЛОНАСС измерениям. На примере сильной геомагнитной бури конца мая 2017 г. и ВСП зимы 2015–2016 гг., показана возможность выявления аномалий в межсуточной изменчивости геостационарного ТЕС, причем амплитуды обнаруженных аномалий, обусловленных метеорологическими и геомагнитными факторами, оказались сопоставимы по величине.

Растущее число приемников сигналов, а также двухчастотных геостационарных спутников в созвездиях навигационных систем дает возможность в будущем включить данный тип данных в процедуры ионосферной радиотомографии и интерферометрии.

Авторы благодарны IGS-MGEX, WDC Kyoto и NASA за используемые данные. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 16-35-60018 и 16-05-01024).

-
- [1] *Forbes J. M., Palo S. E., Zhang X. J.* Atmos. Solar-Terr. Phys. 2000. **62**. P. 685.
 - [2] *Rishbeth H., Garriott O. K.* Introduction to Ionospheric Physics. San Diego, Calif: Academic, 1969.
 - [3] *Кореньков Ю. Н., Клименко М. В., Клименко В. В., Бес-сараб Ф. С.* Глобальный отклик системы термосфера-ионосфера на внезапные стратосферные потепления, в книге Современные достижения в плазменной гелиогеофизике / под ред. Л. М. Зеленого, А. А. Петруковича, И. С. Веселовского. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 424.
 - [4] *Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J.* Global Positioning System: Theory and Practice. New York. Springer-Verlag Wien, 1992.
 - [5] *Kunitsyn V. E., Kurbatov G. A., Yasyukevich Yu. V., Padokhin A. M.* IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett. 2015. **12**, N 3. P. 547.
 - [6] *Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Kurbatov G. A., Yasyukevich Y. V., Morozov Y. V.* GPS Solutions. 2016. **20**, N 4. P. 877.
 - [7] *Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Nesterov I. A., Padokhin A. M.* Ionospheric sounding and tomography by GNSS. In Geodetic Sciences—Observations, Modeling and Applications, Prof. Shuanggen Jin (Ed.), P. 223. InTech Rijeka, Croatia, 2013.
 - [8] *Montenbruck O., Steigenberger P., Khachikyan R., Weber G., Langley R. B., Mervart L., Hugentobler U.* Inside GNSS. 2014. **9**, N 1. P. 42.
 - [9] *Prolss G. W.* Ionospheric F-region storms. In: Volland H (ed) Handbook of atmospheric electrodynamics. CRC Press, Boca Raton, 1995.
 - [10] *Tsagouri I, Belehaki A, Moraitis G, Mavromichalaki H.* Geophys. Res. Lett. 2000. **37**, N 21. P. 3579.
 - [11] *Goncharenko L. P., Coster A. J., Chau J. L. et al.* *J. Geophys. Res.* 2010. **115**. P. A00G07.
 - [12] *Goncharenko L. P., Chau J. L., Liu H.-L., Coster A. J.* *Geophys. Res. Lett.* 2010. **37**. P. L10101.
 - [13] *Goncharenko L. P., Zhang S.-R.* *Geophys. Res. Lett.* 2008. **35**. P. L21103.
 - [14] *Polyakova A. S., Chernigovskaya M. A., Perevalova N. P.* *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2014. **120**. P. 15.
 - [15] https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/ann_data.html

Application of the signals of COMPASS/BeiDou geostationary satellites for the studies of ionospheric effects of geomagnetic storms and sudden stratospheric warmings

G. A. Kurbatov¹, E. A. Kozlovtzeva¹, A. S. Yasyukevich², Yu. V. Yasyukevich^{2,a}, A. M. Padokhin^{1,b}

¹Department of Atmospheric Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia

²Institute of Solar–Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia
E-mail: ^ayasyukevich@iszf.irk.ru, ^bpadokhin@physics.msu.ru

We consider ionospheric effects of strong (G3) geomagnetic storm of the end of May, 2017 and sudden stratospheric warming events of 2015–2016 winter season and discuss the possibilities of using the signals of COMPASS/BeiDou geostationary satellites for studying ionospheric variability caused by different geomagnetic and meteorological disturbing factors.

PACS: 94.20.Vv

Keywords: Global Navigational Satellite Systems, COMPASS/BeiDou, ionosphere, radiosounding, geomagnetic storms, sudden stratospheric warmings.

Received 05 July 2017.

Сведения об авторах

1. Курбатов Григорий Александрович — ведущий инженер; тел.: (495) 939-28-77, e-mail: kurbatov_ga@physics.msu.ru.
 2. Козловцева Екатерина Анатольевна — студент; (495) 939-28-77, e-mail: ko-cat@ya.ru.
 3. Ясюкевич Анна Сергеевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (395) 256-45-54, e-mail: annpol@iszf.irk.ru.
 4. Ясюкевич Юрий Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (395) 256-45-54, e-mail: yasukevich@iszf.irk.ru.
 5. Падохин Артем Михайлович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; (495) 939-28-77, e-mail: padokhin@physics.msu.ru.
-