

УДК 550.388.2

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА СВЕРХНОВОЙ НА ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ СДВ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ И МАГНИТОМЕТРОВ

© 2024 г. С. А. Рябова^{1, 2, *}, В. А. Пилипенко¹, Г. М. Коркина³, М. С. Соловьева¹,
Ю. В. Поклад²

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

³Геофизическая служба РАН, Камчатский филиал, Петропавловск-Камчатский, Россия

*ryabovasa@mail.ru

Поступила в редакцию 05.10.2023 г.

После доработки 02.11.2023 г.

Принята к публикации 07.11.2023 г.

Орбитальные рентгеновские и гамма-телескопы зарегистрировали 9.X.2022 самый мощный из когда-либо наблюдаемых взрывов во Вселенной — гамма-всплеск GRB221009A. Отклик ионосферы Земли на это уникальное событие был обнаружен в принимаемых сигналах сверхдлинноволновых (СДВ) радиотрасс, проходящих как через дневную, так и ночную ионосферу. Возмущение в ночном секторе наблюдалось как внезапное уменьшение амплитуды до 7 дБ и резкий скачок фазы сигнала до 20...30°. В дневном секторе были обнаружены менее выраженные скачки амплитуды до 1.5 дБ. На магнитометрах в момент вспышки в ночные часы отмечено лишь появление слабого всплеска геомагнитного поля ~0.5 нТл. В дневные часы наблюдался изолированный геомагнитный импульс с амплитудой до 1 нТл. Появление геомагнитного отклика на гамма-вспышку представляется удивительным, т.к. ее излучение создает дополнительную ионизацию в стратосфере, существенно ниже проводящего Е-слоя ионосферы. Зарегистрированное событие показало, что внегалактические гамма-всплески вызывают заметное возмущение в земной ионосфере, а покрывающую нижнюю ионосферу сеть СДВ-радиотрасс можно рассматривать как гигантский гамма-детектор.

DOI: 10.31857/S0023420624050096, EDN: IGZPMB

ВВЕДЕНИЕ

Гамма-всплески (Gamma Ray Burst — GRB) представляют собой интенсивные вспышки гамма-излучения, которые обычно длятся от долей секунды до нескольких минут. Эти явления были случайно обнаружены в 1960-х гг. орбитальными детекторами, следящими за ядерными испытаниями в атмосфере [1]. Также гамма-вспышки выступают индикаторами космических катастроф в других галактиках. Например, GRB могут быть вызваны взрывом сверхновой звезды, порождающим черную дыру. При образовании черной дыры возникают мощные потоки частиц со световой скоростью, которые взаимодействуют с оставшимся веществом звезды-предшественника, испуская рентгеновские и гамма-лучи.

Энергия гамма-всплесков крайне велика: за несколько секунд они могут излучать столько же энергии, сколько Солнце излучает за 10 млрд лет своей жизни. Мощность GRB обусловлена коллимированностью их излучения — энергия взрыва оказывается сконцентрированной в очень узком направлении. Если луч направлен в сторону наблюдателя, достаточно яркую вспышку гамма-излучения можно обнаружить рентгеновскими телескопами даже с расстояния многих миллиардов световых лет [2].

С тех пор было выполнено много спутниковых наблюдений, в которых регистрировались гамма-всплески [например, 3, 4]. Позже было выяснено, что гамма-вспышки могут вызываться высотными грозowymi разрядами в результате тормозного излучения электронов, ускоренных

до релятивистских скоростей в электрическом поле разряда (т.н. Terrestrial Gamma Flashes – TGF) [5, 6]. Гамма-излучение также составляет высокоэнергетическую часть излучения солнечных вспышек [7].

Телескоп Gemini зарегистрировал 9.X.2022 самый мощный из наблюдавшихся взрывов во Вселенной — гамма-всплеск GRB221009A, который произошел на расстоянии 2.4 млрд световых лет от Земли [8]. Это уникальное событие было также обнаружено с помощью орбитальных рентгеновских и гамма-телескопов [9, 10]. Гамма-всплеск содержал в своем спектре фотоны самых высоких энергий из когда-либо обнаруженных, достигавших 18 ТэВ [11]. На сегодняшний день имеются данные всего о нескольких таких событиях с энергией излучения в ТэВ-диапазоне, и GRB221009A оказалась первой вспышкой с энергией выше 10 ТэВ.

Несмотря на колоссальное удаление от Земли, ионосферные отклики на внегалактические катастрофы регистрируются системами радиопросвечивания нижней ионосферы на сверхдлинноволновых (СДВ) радиотрассах от очень

низкочастотных (ОНЧ, частоты порядка десятков килогерц) передатчиков. С помощью СДВ-радиопросвечивания были обнаружены ионосферные отклики на такие уникальные внегалактические события как вспышка магнетара [12, 13] и GRB [14]. Исключительно мощный всплеск GRB221009A создал ионосферное возмущение, которое было заметно на СДВ-радиотрассах как в ночные, так и дневные часы [15, 16].

Оказалось, что гамма-вспышку GRB221009A зарегистрировала и система радиопросвечивания нижней ионосферы по СДВ-трассам с приемником на полуострове Камчатка. Хотя эта система создавалась для дистанционного обнаружения землетрясений [17, 18] и цунами [19], ее чувствительность оказалась достаточной для регистрации вспышки сверхновой. В настоящей работе приводятся результаты регистрации этого уникального события. Данные ионосферного зондирования дополнены наблюдениями на мировой сети магнитометров.

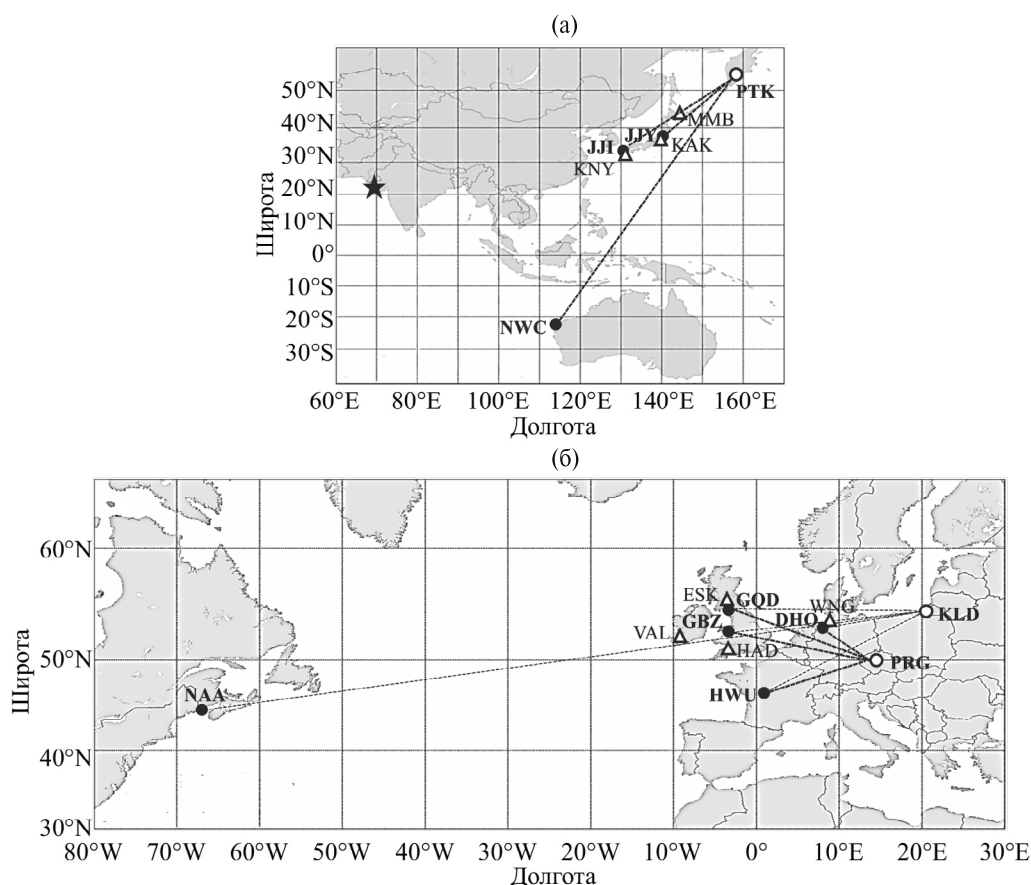


Рис. 1. Схема СДВ радиотрасс, контролируемых (а) приемником в г. Петропавловске-Камчатском (РТК), (б) приемниками в г. Праге (PRG) и в г. Калининграде (KLD). Большой звездочкой показана подвспышечная точка.

СПУТНИКОВЫЕ И НАЗЕМНЫЕ ДАННЫЕ

Одним из космических телескопов, зарегистрировавших GRB221009A, стал *Solar Orbiter*. Этот космический аппарат (КА) Европейского Космического Агентства начал работать в 2021 г. Околосолнечная орбита *Solar Orbiter* приближается к Солнцу до 42 млн км, ближе орбиты Меркурия. Для проведения наблюдений спутник оснащен целым рядом различных инструментов, в том числе детектором STIX (Spectrometer Telescope for Imaging X-rays) для регистрации рентгеновского и гамма-излучения в нескольких энергетических каналах [20], данные которого использованы в работе.

Изучение данных регистрации в двух диапазонах энергий жесткого (0.05...0.4 нм) и мягкого (0.1...0.8 нм) потоков рентгеновского излучения с геостационарных спутников *GOES-14*, -15 и данных в ультрафиолетовом излучении в полосе 5...20 нм КА *GOES-13* к обнаружению отклика на всплеск GRB221009A не привело. Также были

проанализированы результаты регистрации ОНЧ-сигналов от разных передатчиков, принимаемые приемником геофизического комплекса на Камчатке в г. Петропавловске-Камчатском (РТК). Непрерывная работа этой системы поддерживается силами сотрудников Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» [21]. Схема радиотрасс показана на рис. 1а. Приемник ОНЧ ведет с шагом 20 с запись амплитуды (в децибелах) и фазы (в градусах) принимаемых сигналов.

Для контроля возможных ионосферных возмущений в дневные часы был проведен анализ данных регистрации ОНЧ-сигналов от разных передатчиков, принимаемых приемниками в Чехии, в г. Праге (PRG) и в г. Калининграде (KLD). Измерения в обоих пунктах выполняются в непрерывном режиме с 2021 г. Схема используемых в настоящей работе радиотрасс показана на рис. 1б. Приемник ОНЧ, расположенный в Праге, записывает с шагом в 5 с амплитуду

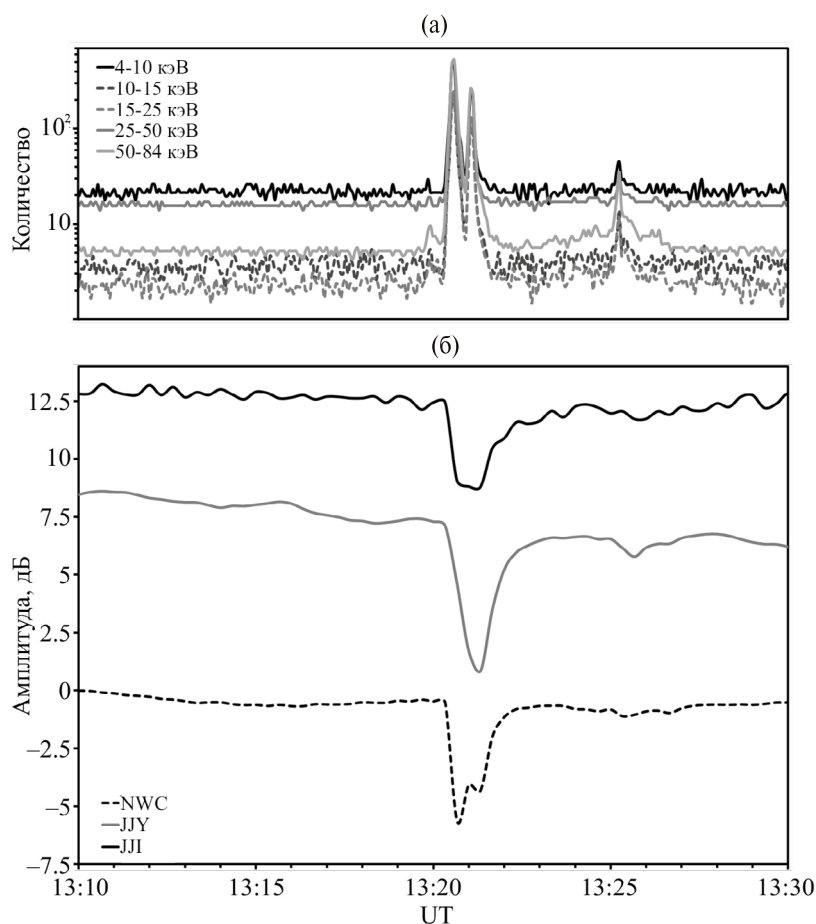


Рис. 2. Вариации гамма-излучения в разных энергетических каналах по данным прибора STIX (а) и вариации амплитуды сигнала, принимаемого в РТК по трассам JJY, JJI и NWC (б).

(в децибелах) принимаемых сигналов. Приемник ОНЧ, в Калининграде, регистрирует и амплитуду (в децибелах) и фазу (в градусах) принимаемых сигналов с шагом в 1 с.

Подвспышечная область Земли приходилась на Индию, а подсолнечная точка находилась в Атлантическом океане. В настоящей работе рассматриваются ночные радиотрассы, проходящие через Японию и Юго-Восточную Азию (приемник в г. Петропавловске-Камчатском), и дневные радиотрассы, проходящие через Европу и Атлантику (приемники в г. Праге и Калининграде).

Ионосферные наблюдения дополнены односекундными и одномоментными данными магнитометров INTERMAGNET в том же регионе, что и СДВ-радиотрассы. Положение магнитных станций показано на рис. 1.

ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК НА GRB

Самый мощный всплеск гамма-излучения во всех 5 энергетических каналах от 4 до 84 кэВ был зарегистрирован детектором STIX примерно в

13:20 UT (рис. 2). Всплеск имел характер двойного импульса с суммарной длительностью ~1.5 мин. Более слабый и короткий всплеск зарегистрирован в 13:25 UT.

Внезапное возмущение ночной ионосферы Земли наблюдалось на трассах, наиболее близких к Индийскому океану — JJY, JJI, NWC. Вариации амплитуды сигнала на этих трассах показаны на рис. 2. Возмущение на всех радиотрассах проявилось как внезапное уменьшение амплитуды сигнала ~2...7 дБ. Сигнал от передатчика VTX в Индии довольно слабый, и в нем возмущение амплитуды сигнала было наиболее слабым.

Более детально возмущение амплитуды и фазы на отдельных радиотрассах JJY и NWC показаны на рис. 3. Скачок фазы здесь достигает ~10...30°.

При солнечных вспышках максимум возмущения на радиотрассе запаздывает на 2...3 мин относительно максимума рентгеновского потока. В данном событии задержка между максимумами потока гамма-квантов и скачка амплитуды СДВ-сигнала составляет ~30 с для NWC

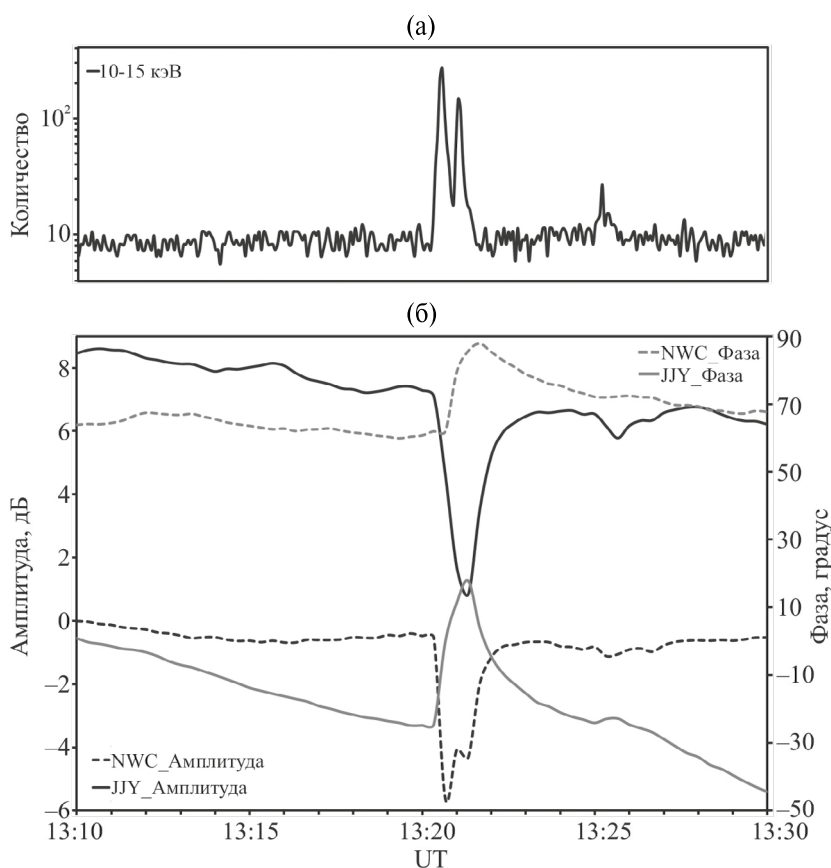


Рис. 3. Вариации гамма-излучения в энергетическом канале 10...15 кэВ по данным прибора STIX (а) и возмущения амплитуды и фазы на радиотрассах JJY и NWC (б).

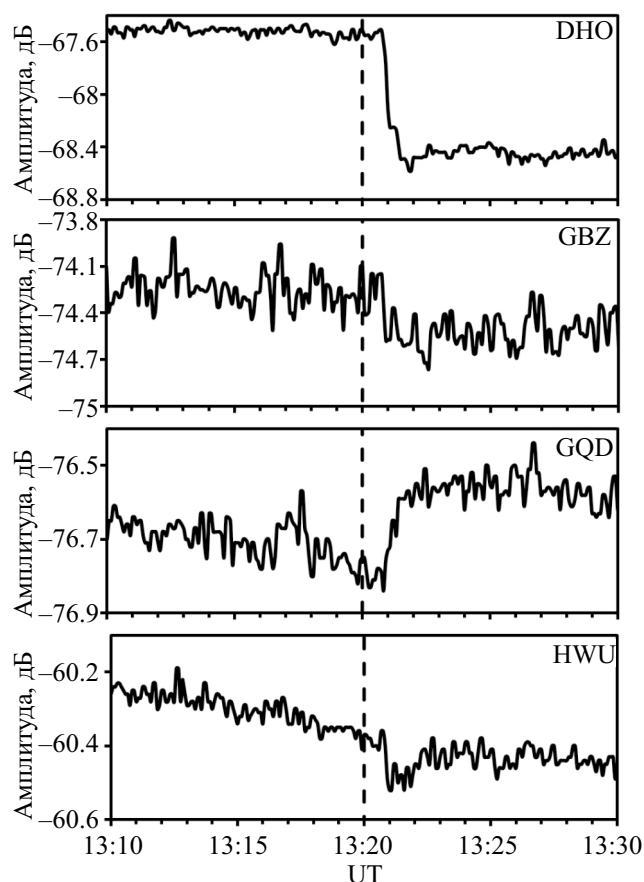


Рис. 4. Вариации амплитуды сигнала, принимаемого в PRG по трассам DHO, GBZ, GQD и HWU. Вертикальный пунктир показывает момент гамма-вспышки.

и ~80 с для JJY, а задержка между максимумом гамма-всплеска и скачком фазы ~80 с для NWC и JJY. Время восстановления до предвспышечного уровня амплитуды сигнала составляет ~2...3 мин и для фазы ~5 мин.

Из трасс СДВ, принимаемых приемником PRG, через освещенную ионосферу проявилась реакция на гамма-вспышку (рис. 4). Амплитуда сигнала ведет себя по-разному. В части случаев происходит скачкообразное падение амплитуды, в частности, на трассах DHO, GBZ, NWU уменьшение амплитуды равно ~1.1, ~0.5 и ~0.2 дБ соответственно. На некоторых трассах происходит небольшое увеличение амплитуды, например, на трассе GQD амплитуда увеличивается на ~0.3 дБ.

На трассах, принимаемых в KLD, также проявилась реакция на гамма-вспышку (рис. 5). На трассах GBZ, GQD, NAA в момент вспышки наблюдалось резкое увеличение фазы. Хотя на некоторых трассах DHO, HWU эффект очень слабый.

Амплитуда сигнала ведет себя по-разному. В части случаев происходит положительный скачок (DHO, NAA) в момент гамма-вспышки, а на некоторых трассах происходит небольшое падение амплитуды (GBZ, GQD, HWU).

ГЕОМАГНИТНЫЙ ОТКЛИК НА ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ

Для поисков геомагнитного отклика на вспышку в ночной полусфере были отобраны данные магнитометров в северном полушарии — MMB, KAK, KNY (рис. 1a). Магнитограммы горизонтальных X -, Y -компонент этих станций с удаленным трендом показаны на рис. 6. Во время гамма-вспышки в ночной полусфере можно отметить лишь появление слабого всплеска геомагнитного поля с амплитудой <0.5 нТл и длительностью ~1...2 мин на уровне фоновых вариаций.

В дневной полусфере на станциях сети INTERMAGNET (ESK, HAD, VAL, WNG — рис. 1б) отчетливо виден уединенный импульс с амплитудой по X -компоненте до ~0.5 нТл, и по Y -компоненте до 0.8 нТл длительностью 5...7 мин (рис. 7).

ОБСУЖДЕНИЕ

Принятый сигнал от удаленных ОНЧ-передатчиков представляет собой сумму земной волны и многоскачковых сигналов волновода Земля — ионосфера. Ионизация нижней ионосферы комптоновскими электронами гамма-квантов изменяет отражение / поглощение ионосферной волны, что приводит к модификации интерференционной картины и изменению амплитуды / фазы зондирующего сигнала. В результате, амплитуда и фаза сигнала могут как увеличиваться, так и уменьшаться [22]. Обычно при солнечных рентгеновских вспышках амплитуда сигнала на трассах приемника РТК резко увеличивалась [23, 24]. В анализируемом событии воздействие гамма-вспышки вызвало резкое падение амплитуды принимаемого СДВ-сигнала. Время восстановления фазы до довспышечного уровня ~300 с примерно соответствует времени рекомбинации ионизированных ионов на высотах ~70 км.

По представленным данным величина возмущения амплитуды от этой гамма-вспышки на СДВ-радиотрассах в ночном секторе (до 7 дБ) превосходила возмущение, которое наблюдалось в дневные часы. Поскольку электронная концентрация в нижней ионосфере мала в ночные часы, то дополнительную ионизацию от

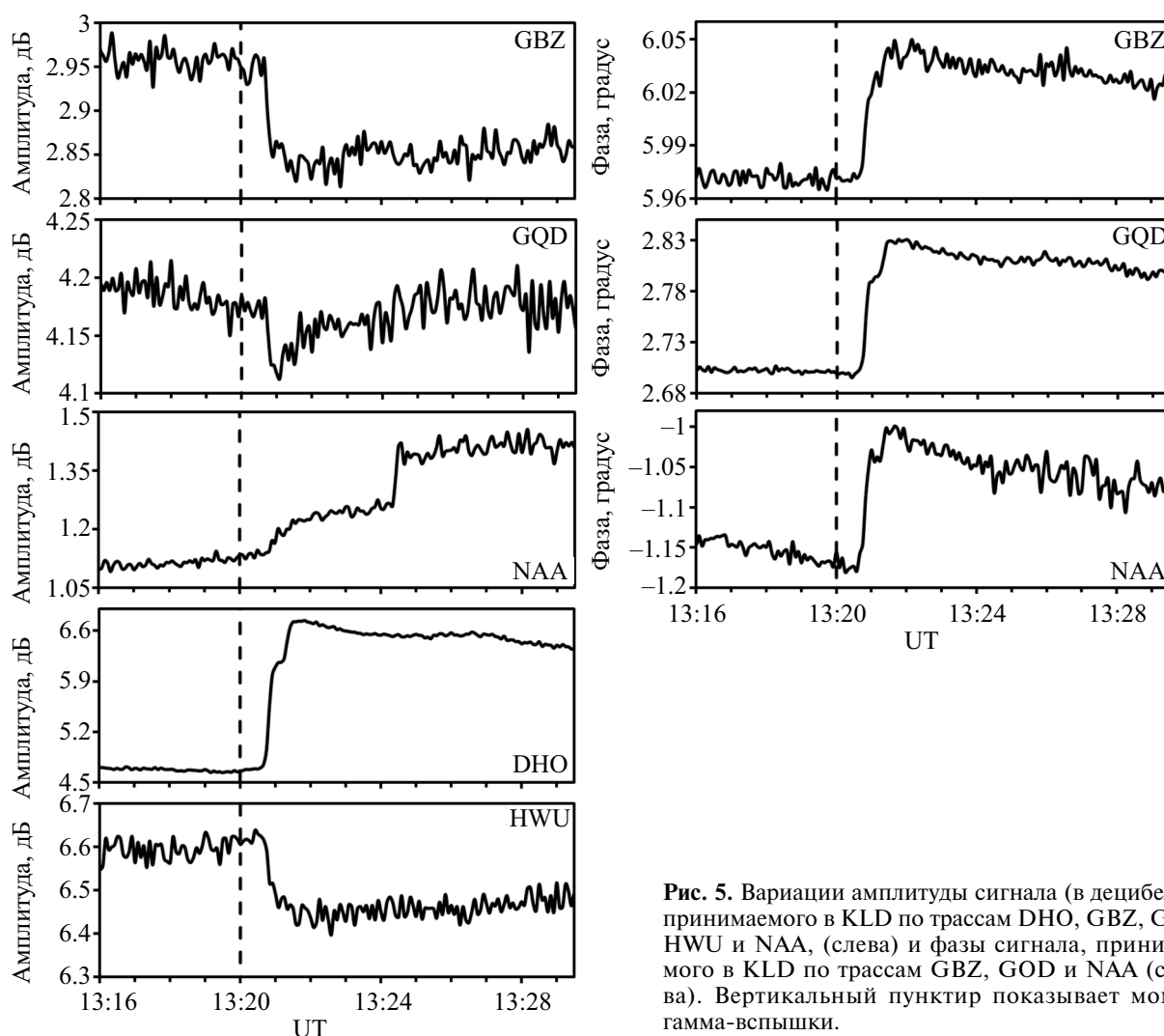


Рис. 5. Вариации амплитуды сигнала (в децибелах), принимаемого в KLD по трассам DHO, GBZ, GOD, HWU и NAA, (слева) и фазы сигнала, принимаемого в KLD по трассам GBZ, GOD и NAA (справа). Вертикальный пунктир показывает момент гамма-вспышки.

внегалактических источников легче обнаружить именно в этот период. Однако исключительно мощный всплеск GRB221009A создал ионосферное возмущение, которое было заметно даже на СДВ-радиотрассе в дневные часы [15, 16].

Вспышка может давать наибольшую ионизацию на разных высотах в зависимости от ее энергетического спектра. Фотоны разной энергии ионизируют атмосферу — ионосферу на разных высотах: ультрафиолетовое излучение ионизирует F-область, мягкое рентгеновское излучение (с длиной волны 1...10 нм) — E-слой, жесткое рентгеновское излучение (0.1–1 нм) достигает D-области [25]. Гамма-излучение с энергией >20 кэВ проникает через ионосферу в верхние слои атмосферы и поглощается на высотах <60 км. На высотах D-слоя (70...80 км), в наибольшей степени влияющего на распространение СДВ-радиосигналов, поглощаются фотоны с энергией ~5 кэВ. Гамма-всплеск GRB221009A

оказался способен дополнительно ионизировать как высоты стратосферы (40...60 км), так и D-слой (70...80 км). Если вклад мягкого рентгена в спектр гамма-вспышки GRB221009A мал, то ионизация E-слоя будет невелика.

Количественная интерпретация зарегистрированных эффектов возможна с помощью численных моделей модификации атмосферы — ионосферы под действием гамма-излучения с заданным спектром и последующего расчета распространения сигнала вдоль заданной радиотрассы. Такие расчеты были проведены для радиотрассы Гавайи — Антарктида в ночные часы, модифицированной воздействием гамма-вспышки, вызванной магнетаром [13]. Согласно расчетам наблюдаемое падение амплитуды на ~20 дБ и скачок фазы на ~65° были вызваны увеличением плотности плазмы на высоте 80 км на 50 см^{-3} . Для согласования результатов расчета с наблюдениями было сделано допущение о

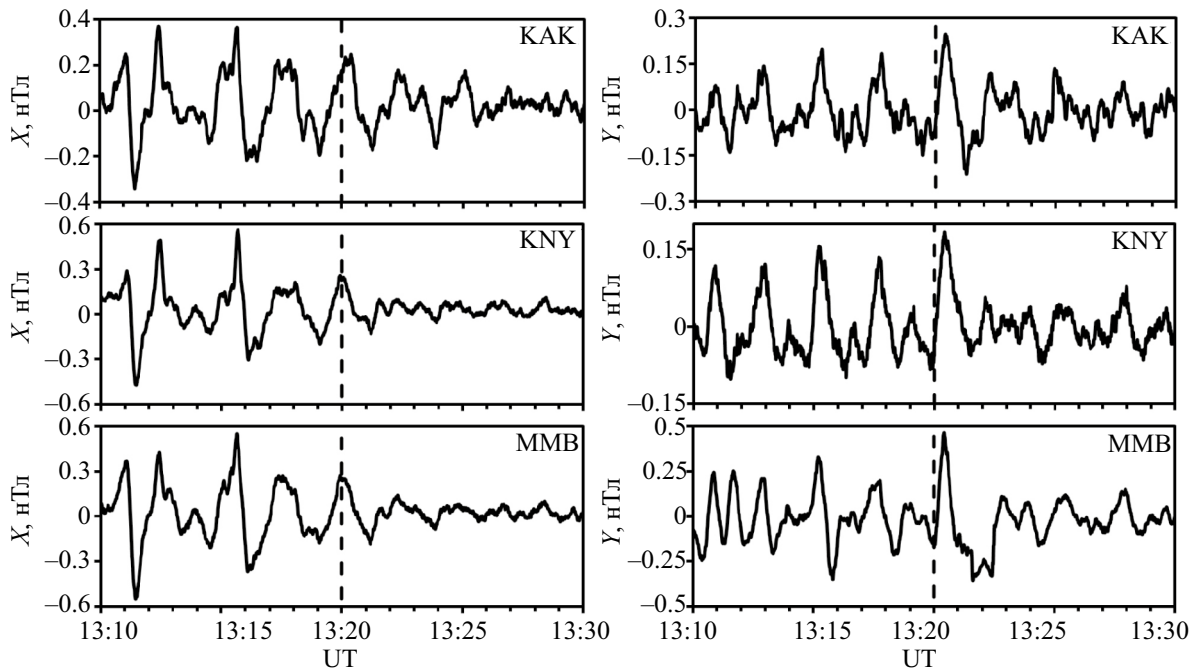


Рис. 6. Магнитограммы X (слева) и Y (справа) компонент станций MMB, KAK, KNY в ночном секторе в северном полушарии. Вертикальный пунктир показывает момент гамма-вспышки.

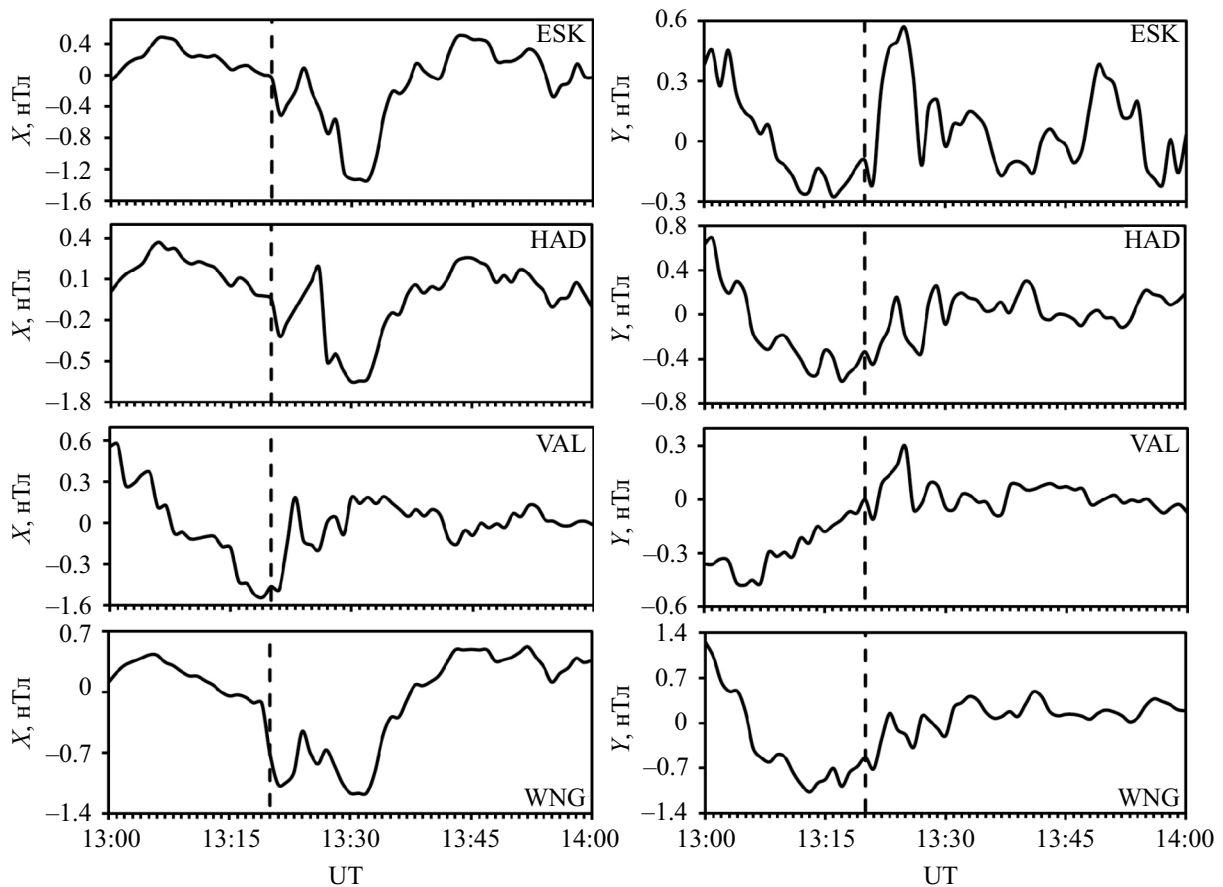


Рис. 7. Магнитограммы X (слева) и Y (справа) компонент станций ESC, HAD, VAL, WNG в дневном секторе. Вертикальный пунктир показывает момент гамма-вспышки.

существенном вкладе в гамма-вспышку фотонов с энергиями 3...10 кэВ.

Особого внимания заслуживает относительно слабый, но отчетливый, геомагнитный импульс. В энергетическом спектре солнечных гамма-вспышек присутствуют рентгеновская и УФ-компоненты, которые ионизируют как D-слой, так и E-слой. Холловская проводимость ионосферы и ионосферные токи сконцентрированы в проводящем E-слое (110...130 км). Поскольку именно холловские токи ответственны за наземные геомагнитные возмущения, ионизация E-слоя приводит к появлению геомагнитного отклика — бухты длительностью 30...60 мин. Насколько велик вклад рентгеновской и УФ-компонент в энергетический спектр GRB пока не выяснено. Если он мал, то ионизация создается преимущественно в стратосфере (40...60 км), где нет токов, способных вызвать геомагнитный отклик. Поэтому появление магнитного отклика на жесткие гамма-вспышки представляется удивительным [26]. Возможно, этот эффект указывает на вероятность электродинамической связи между стратосферой и нижней ионосферой. Высказывалась гипотеза, что комптоновские электроны от гамма-вспышек могут кратковременно создавать область с объемным электрическим зарядом. Токи от этого заряда растекаются через проводящий E-слой, что и приводит к появлению магнитного импульса [27].

Также предполагалось, что создаваемая в стратосфере область с высокой ионизацией и сильным поляризационным электрическим полем может оказаться достаточной для высотного электрического разряда [28]. Такой разряд вызовет высокочастотный отклик в геомагнитном поле. Однако экспериментальных подтверждений этому механизму в изучаемом событии в настоящем исследовании получить не удалось. В шумах на частоте Шумановского резонанса, являющегося чувствительным индикатором планетарной грозовой активности, отклика на гамма-вспышку по данным высокочастотных индукционных магнитометров сети PWING [29] не обнаружено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сети СДВ-радиотрасс в освещенной и неосвещенной ионосферах обнаружили резкое спадание амплитуды и скачок фазы сигналов, вызванных гамма-вспышкой GRB221009A. Приведенные результаты, наряду с имеющимися в литературе наблюдениями, показывают,

что система СДВ-мониторинга нижней ионосферы (D-слой) представляет собой гигантский детектор для улавливания рентгеновских и гамма-вспышек от астрономических объектов. Обнаружен геомагнитный импульс, особенно отчетливый в дневной полусфере. Механизм генерации этого импульса остается невыясненным.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны Л.К. Кашаповой и И.Н. Шарыкину за помощь в получении данных, Е.А. Полянской — за помощь в обработке информации и рецензенту за конструктивные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа проведена в рамках госзаданий ИФЗ РАН и ИДГ РАН (№ 122032900185-5). Обработка данных с приемника в г. Калининграде выполнялась в рамках госзадания ИДГ РАН (№ 122032900175-6). В работе использованы данные СДВ-зондирования ионосферы, полученные на уникальной научной установке «Комплекс непрерывного сейсмического мониторинга РФ, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436>), развернутой при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 075-00576-21. Также использованы данные эксперимента STIX на космическом аппарате *Solar Orbiter* (<https://datacenter.stix.i4ds.net/>), рентгеновских детекторов спутников *GOES*-11, -12 (<https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/avg/>), магнитных станций сети INTERMAGNET (<https://www.intermagnet.org>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klebesadel R.W., Strong I.B., Olson R.A. Observations of gamma-ray bursts of cosmic origin // *Astrophysical J.* 1973. V. 182. Iss. L85. DOI:10.1086/181225.
2. O'Connor B., Troja E., Ryan G. et al. A structured jet explains the extreme GRB 221009A // *Science Advances*. 2023. V. 9. Iss. 23. DOI: 10.1126/sciadv.ad1405.
3. Abdo A.A., Ackermann M., Arimoto M. et al. Fermi observations of high-energy gamma-ray emission from GRB 080916c // *Science*. 2009. V. 323. Iss. 5922. P. 1688–1693. DOI: 10.1126/science.1169101.
4. Позаненко А.С., Барков М.В., Минаев П.Ю. и др. Космические гамма-всплески: многоволновые исследования и модели // *Письма в Астрономический журнал*. 2021. Т. 47. № 12. С. 823–865. DOI: 10.31857/S0320010821120032.

5. Carlson B.E., Lehtinen N.G., Inan U.S. Terrestrial gamma ray flash production by lightning current pulses // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2009. V. 114. Iss. 12. DOI: 10.1029/2009JA014531.
6. Surkov V.V., Pilipenko V.A. Estimate of the source parameters of terrestrial gamma-ray flashes observed at low-Earth-orbit satellites // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2022. V. 237. Iss. 23. DOI: 10.1016/j.jastp.2022.105920.
7. Hayes L.A., O'Hara O.S.D., Murray S.A. et al. Solar flare effects on the Earth's lower ionosphere // *Solar Physics*. 2021. V. 296. Iss. 11. DOI: 10.1007/s11207-021-01898-y.
8. Williams M.A., Kennea J.A., Dichiara S., et al. GRB221009A: Discovery of an exceptionally rare nearby and energetic gamma-ray burst // *Astrophysical J. Letters*. 2023. V. 946. Iss. L24. DOI: 3847/2041-8213/acbcd1.
9. Frederiks D., Svinkin D., Lysenko A.L. et al. Properties of the extremely energetic GRB221009A from Konus-WIND and SRG/ART-XC observations // *Astrophysical J. Letters*. 2023. V. 949. Iss. 1. DOI: 10.3847/2041-8213/acd1eb.
10. Штерн Б., Ткачев И. GRB221009A, его предшественник и два послесвечения в данных Ферми // *Письма в ЖЭТФ*. 2023. Т. 118. С. 562–569. DOI: 10.31857/S123456782320003X
11. LHAASO collaboration A tera-electron volt afterglow from a narrow jet in an extremely bright gamma-ray burst // *Science*. 2023. V. 380. Iss. 6652. P. 1390–1396. DOI: 10.1126/science.adg9328.
12. Соловьева М.С., Рожной А.А. Нарушения ОНЧ / НЧ сигналов на дальневосточных трассах 27 декабря 2004 г., вызванные гамма-вспышкой магнетара SGR 1806-20 // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2015. Т. 55. № 6. С. 833–838.
13. Inan U.S., Lehtinen N.G., Lev-Toy S.J. et al. Ionization of the lower ionosphere by 7-rays from a magnetar: Detection of a low energy (3-10 keV) component // *Geophysical Research Letters*. 1999. V. 26. Iss. 22. P. 3357–3360.
14. Fishman G., Inan U. Observation of an ionospheric disturbance caused by a gamma-ray burst // *Nature*. 1988. V. 331. P. 418–420. DOI: 10.1038/331418a0.
15. Hayes L.A., Gallagher P.T. A significant sudden ionospheric disturbance associated with gamma-ray burst GRB221009A // *Research Notes of the AAS*. 2022. V. 6. Iss. 10. DOI: 10.3847/2515-5172/ac9d2f.
16. Pal S., Hobara Y., Shvets A. et al. First detection of global ionospheric disturbances associated with the most powerful gamma ray burst GRB221009A // *Atmosphere*. 2023. V. 14. Iss. 2. DOI: 10.3390/atmos14020217.
17. Hayakawa M. Earthquake prediction with radio techniques. Singapore: Wiley, 2015. 294 p.
18. Rozhnoi A., Solovieva M., Hayakawa M. VLF/LF signals method for searching of electromagnetic earthquake precursors // *Earthquake prediction studies: seismo electromagnetics*. Tokyo: TERRAPUB, 2013. P. 31–48.
19. Шалимов С.Л., Рожной А.А., Соловьева М.С. и др. Воздействие землетрясений и цунами на ионосферу // *Физика Земли*. 2019. № 1. С. 199–213. DOI: 10.31857/S0002-333720191199-213.
20. Krucker S., Hurford G.J., Grimm O., et al., The spectrometer/telescope for imaging X-rays (STIX) // *Astronomy and Astrophysics*. 2020. V. 642. DOI: 10.1051/0004-6361/201937362.
21. Копылова Г.Н., Будилова Е.А., Соловьева М.С. и др. Модернизация системы радиоволнового мониторинга в КФ ФИЦ ЕГС РАН // *Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов*. Тр. VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 405–409.
22. Perona G.E. LF and VLF phase antinomies during solar X-ray flares // *Radio Science*. 1975. V. 10. Iss. 4. P. 435–444.
23. Rozhnoi A., Solovieva M., Fedun V. et al. Strong influence of solar X-ray flares on low-frequency electromagnetic signals in middle latitudes // *Annales Geophysicae*. 2019. V. 37. P. 843–850. DOI: 10.5194/angeo-37-843-2019.
24. Polyanskaya E.A., Solovieva M.S., Pilipenko V.A. et al. Monitoring of the solar flare impact on the ionosphere with VLF radio sounding and magnetometers // *Problems of Geocosmos—2022, Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences* / eds. A. Kostrov, E. Lyskova, I. Mironova, S. Apatenkov, S. Baranov. 2023. P. 361–373.
25. Grubor D., Sulic D., Zigman V. Classification of X-ray solar flares regarding their effects on the lower ionosphere electron density profile // *Annales Geophysicae*. 2008. V. 26. Iss. 7. P. 1731–1740. DOI: 10.5194/angeo-26-1731-2008.
26. Пархомов В.А. Геомагнитные пульсации, связанные с гамма-излучением солнечных вспышек // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1992. Т. 32. С. 130–136.
27. Матрончик А.Ю. О возможном механизме генерации геомагнитных пульсаций гамма-излучением солнечных вспышек // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1995. Т. 34. № 6. С. 179–181.
28. Moldavanov A.V. Stratospheric discharges during solar gamma flares // *J. Physics. D: Applied Physics*. 2003. V. 36. Iss. 1. DOI: 10.1088/0022-3727/36/1/101.
29. Shiokawa K., Nomura R., Sakaguchi K. et al. The STEL induction magnetometer network for observation of high-frequency geomagnetic pulsations // *Earth Planets Space*. 2010. V. 62. P. 517–524.