

УДК :551.586.9,551.510.535

О ВОЗМУЩЕНИЯХ ИОНОСФЕРЫ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ ПОСРЕДСТВОМ GPS ВО ВРЕМЯ МЕТЕОЦУНАМИ

© 2020 г. С. Л. Шалимов^{a, b, *}, Е. В. Ольшанская^a

^aИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Б. Грузинская ул., 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

^bИнститут космических исследований РАН, Профсоюзная ул., 84/32, стр. 14, Москва, 117997 Россия

*E-mail: pmsk7@mail.ru

Поступила в редакцию 15.07.2020 г.

После доработки 29.07.2020 г.

Принята к публикации 05.08.2020 г.

Рассмотрена регистрация посредством спутников GPS ионосферных возмущений во время метеоцунами 23–27 июня 2014 г. в регионе Средиземного моря. Показано, что во время этих событий в верхней ионосфере указанного региона регистрируется интенсификация возмущений, имеющих сходный с вариациями приземного давления и почти одновременными вариациями уровня моря (метеоцунами) спектральный состав. Сделан вывод о возможной связи отклика ионосферы с процессом развития метеоцунами.

Ключевые слова: метеоцунами, GPS, внутренние гравитационные волны

DOI: 10.31857/S0002351520060097

ВВЕДЕНИЕ

Термином “метеорологическое цунами” (метеоцунами) обычно обозначают круг явлений на поверхности моря или океана, обусловленных воздействием на них атмосферы. Эти явления, как правило, связаны с распространением атмосферных внутренних волн, фронтов, скачков давления, шквалов [1, 2].

Формирование значительного метеоцунами проходит через несколько этапов. Обычно вдали от берега формируется начальное возмущение поверхности моря, а именно, скачкообразное падение атмосферного давления на 2–3 гПа вызывает колебания уровня воды высотой всего 2–3 см (поверхность моря как бы “поднимается” в зоне низкого или “опускается” в зоне высокого давления). В процессе распространения возмущения на поверхности воды и при выполнении резонансных условий (как правило, вследствие так называемого резонанса Праудмена, когда скорости возмущений в атмосфере и на водной поверхности близки) это возмущение при подходе к шельфу может достигнуть высоты 10–15 см. На шельфе происходит дальнейшее усиление волны, которая уже может достичь высоты 40–50 см. Наконец, при входе в узкую длинную бухту/гавань высота волны в вершине бухты может увеличиться в 10 раз и даже больше, т.е. достичь катастрофической высоты 4–5 м. При этом скорости течений могут превысить 15–20 узлов. Важно подчеркнуть, что именно соответствие атмосферных

возмущений океанической батиметрии и геометрии бухт/гаваней выделяет возмущения определенной направленности и скорости.

Образующиеся метеоцунами – это длинные океанские волны, которые имеют приблизительно те же масштабы, что и обычные цунами, и могут оказывать аналогичное разрушительное воздействие на побережье, но вызываются они не землетрясениями, извержениями вулканов или подводными оползнями, а указанными атмосферными процессами, причем, как правило, в диапазоне периодов от нескольких минут до нескольких часов [1]. Для настоящего исследования существенно, что этот диапазон периодов перемещающихся атмосферных возмущений соответствует атмосферным внутренним гравитационным волнам (ВГВ).

В свою очередь, атмосферные ВГВ, зарождающиеся в области скачков давления или атмосферных фронтов и затем возмущающие морскую поверхность, могут распространяться от своего источника и до высот ионосферы, где посредством столкновений нейтральных и заряженных частиц приводят в движение ионосферную плазму. Поскольку плотность атмосферы экспоненциально уменьшается с высотой, то при сохранении энергии возмущения амплитуда волн растет по мере ее распространения вверх. Для поверхностного источника коэффициент усиления амплитуды достигает 10^3 на ионосферных высотах и, таким образом, в ионосфере, регистрируя движения плазмы, можно изме-

рять приход атмосферных возмущений, которые были едва различимы на фоне атмосферных шумов в приземном слое. При этом можно ожидать, что спектральный состав возмущений на поверхности моря, в атмосфере и ионосфере будет подобным.

В настоящей работе, на примере наблюдений метеоцунами 23–27 июня 2014 г. в Средиземноморье [3], показано, что во время этих событий в верхней ионосфере указанного региона посредством спутников GPS регистрируется возникновение возмущений, которые имеют сходный с метеоцунами и вариациями приземного давления спектральный состав и, следовательно, могут быть откликом ионосферы на процесс развития метеоцунами.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для детектирования ионосферных возмущений обычно используют стандартные радиотехнические методы, которые позволяют исследовать ионосферу ниже максимума F-слоя. В отличие от них, с помощью спутников GPS можно непосредственно регистрировать вариации полного электронного содержания (Total Electron Content – TEC). GPS включает не менее 24 спутников на шести 12-часовых круговых орбитах (высота 20 200 км) с наклоном 55° ; по крайней мере сигналы четырех спутников можно принимать из любой точки на земной поверхности. Спутники передают высокостабильные когерентные сигналы на частотах $f_1 = 1575.42$ МГц (L1) и $f_2 = 1227.60$ МГц (L2) [4].

Зависимость показателя преломления ионосферной плазмы $n(f)$ от частоты радиоволны f и плазменной частоты $f_p = \omega_e/2\pi = \sqrt{N(s)e^2/\pi m_e}$ можно аппроксимировать формулой

$$n(f) = 1 - \frac{f_p^2}{2f^2} = 1 - \frac{N(s)e^2}{2\pi m_e f^2}.$$

Типичная величина плазменной частоты в ионосфере – порядка 10–20 МГц, так что $f_1, f_2 \gg f_p$. При распространении сигнала через ионосферу со скоростью $v(s) = c/n(f)$, где c – скорость света в вакууме, задержка сигнала $\Delta t(s)$, или изменение фазы $\Delta P(f) = c\Delta t$, определится по формуле

$$\begin{aligned} \Delta P(f) &= \int_{rec}^{sat} (n(f) - 1) ds \approx -\frac{40.35}{f^2} \int_{rec}^{sat} N(s) ds = \\ &= -\frac{40.35 \times IEC}{f^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь IEC – полное электронное содержание на пути распространения сигнала от передатчика до приемника. Для получения TEC, не зависящего от положения спутника, величину IEC соответствующим образом нормализуют [4].

Для компенсации значительных искажений в спутниковых геодезических измерениях используют уравнение относительно TEC, вытекающее из (1):

$$P(f_1) - P(f_2) + P_0 = (-40.35)TEC \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right), \quad (2)$$

где $P(f_1), P(f_2)$ – наземные измерения фаз сигнала от спутника на частотах f_1, f_2 ; P_0 – неизвестный инструментальный сдвиг фазы между частотами, который постоянен для каждой пары спутник–приемник.

Если отвлечься от геометрии распространения сигнала, то возмущение TEC, обусловленное атмосферной волной, можно оценить как

$$\delta TEC = \int_{rec}^{sat} \delta N(s) ds. \quad (3)$$

GPS зондирование ионосферы известно как эффективный метод определения вариаций TEC [4], к преимуществам которого относится возможность одновременной регистрации возмущений по разным направлениям, на большой площади и достаточно длительных временных интервалах.

Для спектрального и спектрально-временного анализа данных вариаций TEC ионосферы в настоящем исследовании использовались непрерывные ряды данных TEC, восстановленные с помощью описанного выше алгоритма по спутниковым сигналам, принимаемым сетью наземных станций GPS, расположенных в окрестности акватории Средиземного моря (географическое расположение GPS-станций и их уникальное четырехсимвольное название обозначено на рис. 1 черными треугольниками с подписями). Данные TEC пропускались программно в среде MATLAB через широкополосный фильтр Баттерворта (Butterworth filter) в диапазоне 120–3600 с. Для анализа проявления во времени частотных составляющих фильтрованного сигнала TEC в рассматриваемом диапазоне использовалось непрерывное вейвлет-преобразование (cwt). Его коэффициенты рассчитывались с помощью симметричного комплекснозначного вейвлета Гаусса 6-го порядка (6-я производная функции Гаусса, объединенная с условием нормировки). При визуализации спектрально-временной диаграммы использовался модуль рассчитанных коэффициентов. Оценка спектральной плотности мощности сигнала производилась в MATLAB с помощью модифицированной функции периодограммы с прямоугольным окном (periodogram).

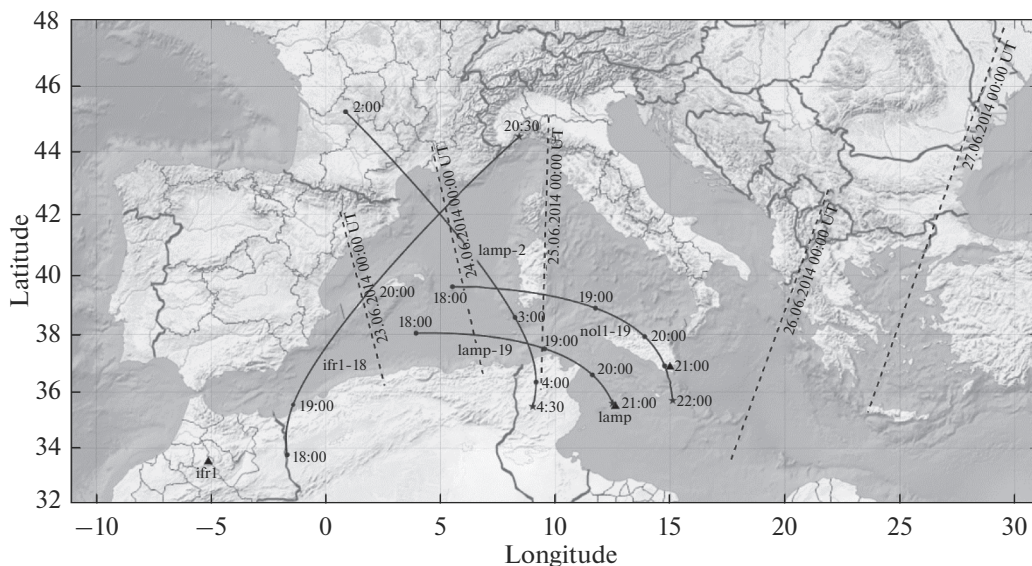


Рис. 1. Карта региона Средиземного моря, где в июне 2014 наблюдались метеоцимены. Черными штриховыми линиями приблизительно отмечены места, где зарегистрирована интенсификация колебаний уровня моря. Линиями отмечены проекции на ионосферу траекторий спутников GPS (с метками времени UT) на 23.06.2014 (в остальные дни проекции траекторий расположены приблизительно также), анализируемые в данной работе, и указаны наименования соответствующих наземных станций.

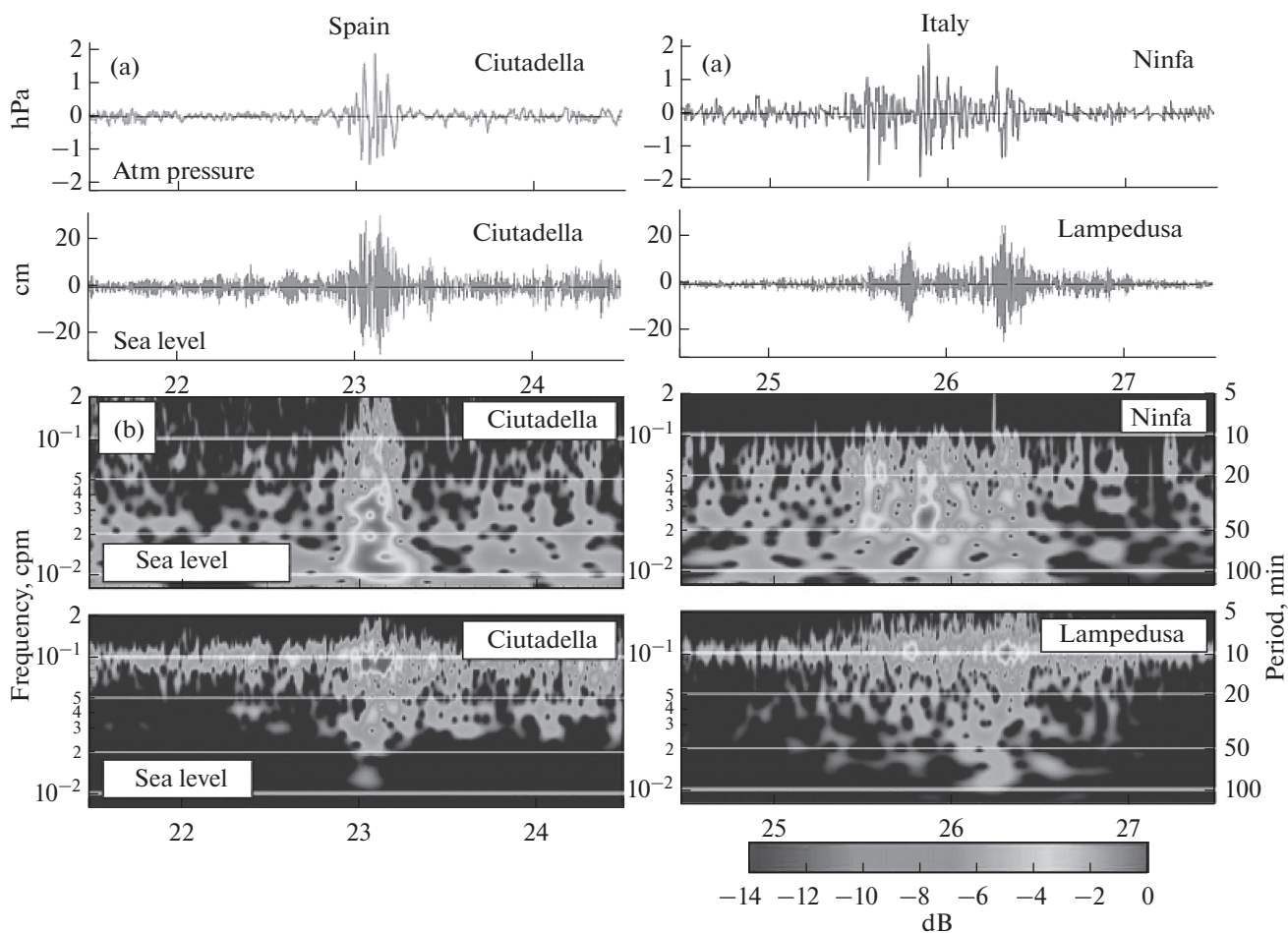


Рис. 2. Вариации атмосферного давления и уровня моря, измеренные в различных местах региона Средиземного моря 23–27 июня 2014 г. (модифицированный рисунок из работы [3]).

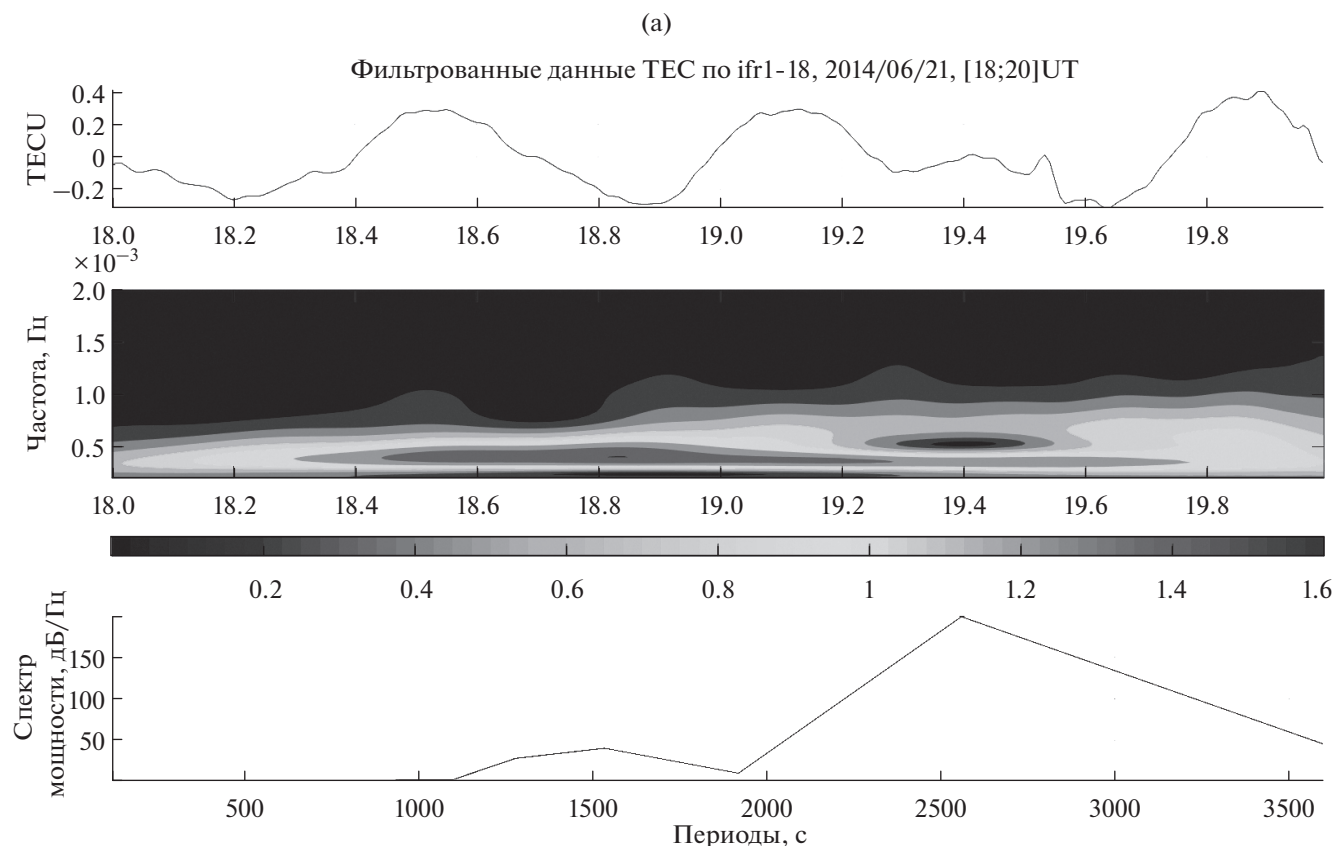


Рис. 3. (a) Пример сигнала в вариациях ТЕС, его вейвлет и спектральная плотность мощности для пары ifr1-prn18 на 21.06.2014. Время указано в UT.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Метеоцунами 22–27 июня 2014 г. (точнее, цепочка отдельных событий)хватило огромную территорию: 23 июня оно проявилось в бухте Сьютаделья в Испании, 25 июня в нескольких бухтах на побережье Хорватии и в Мазаро-дель-Вальо на Сицилии, 26 июня были замечены сильные колебания в Греции и Турции, а 27 июня имело место знаменитое “Одесское цунами” в Черном море (о котором писали в российской и украинской прессе). Атмосферная система, постоянно порождавшая мелкомасштабные атмосферные возмущения, смещалась на северо-восток вдоль экватории, вызывая на своем пути сильные колебания уровня моря и локальные наводнения.

На рис. 1 показана карта региона Средиземного моря, где происходили эти события. Черные пунктирные линии обозначают приблизительное время почти одновременного возникновения колебаний атмосферного давления и уровня моря (по результатам регистрации, данной в работе [3]). Сами результаты измерений вариаций атмосферного давления и уровня моря за указанный период 23–27 июня 2014 г. показаны на рис. 2 [3]. На карту нанесены также проекции траекторий спут-

ников GPS на ионосферу (с метками времени UT) и станции, которые фигурируют в дальнейшем изложении.

Для исследования вариаций ТЕС в ионосфере используем сначала пару ifr1-prn18, выбор которой обусловлен наличием достаточно протяженного участка проекции траектории спутника на ионосферу (следовательно, и геометрического места точек пересечения луча спутник-приемная станция с ионосферой) над акваторией Средиземного моря, где, согласно [3], развивалось событие 22–23.06.2014 (см. рис. 1 и 2). Из данных, представленных на рис. 2, можно заметить почти синхронную активизацию вариаций атмосферного давления и уровня моря в диапазоне 10–30 мин (хотя спектр вариаций давления простирается до часовых периодов). На рис. 3а показан пример сигнала в вариациях ТЕС, его вейвлет и спектральная плотность мощности, а на рис. 3б – последовательное изменение спектра возмущения ТЕС на высотах ионосферы с 21.06.2014 по 25.06.2014 для выбранной проекции траектории. Видно, что 21.06.2014 в диапазоне периодов 10–30 мин возмущения уже существуют. Это вполне соответствует приближению к месту, где проектируется траектория спутника, струйного тече-

(6)

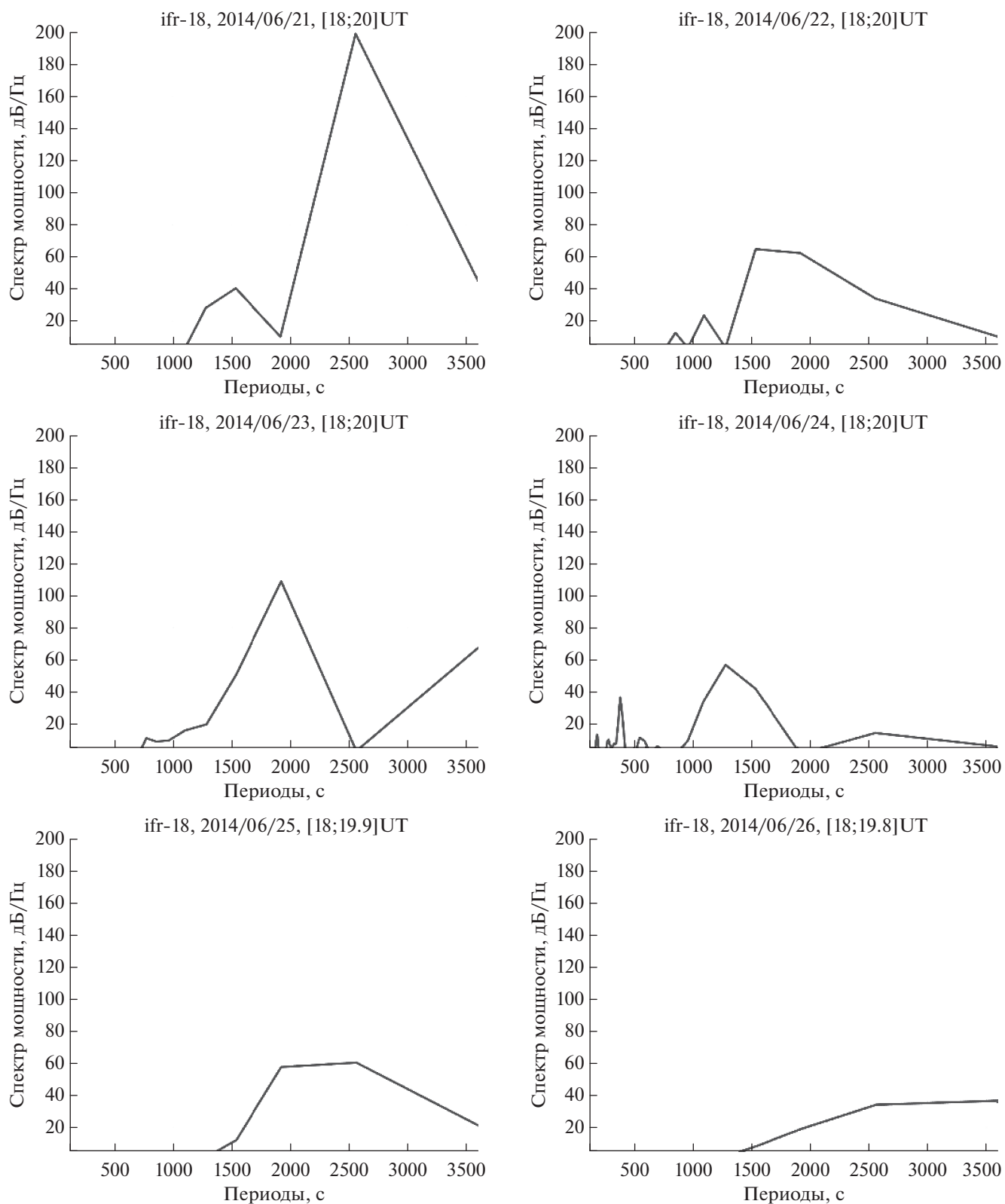


Рис. 3. (6) Эволюция спектральной плотности мощности для пары станция-спутник ifr1-prn18.

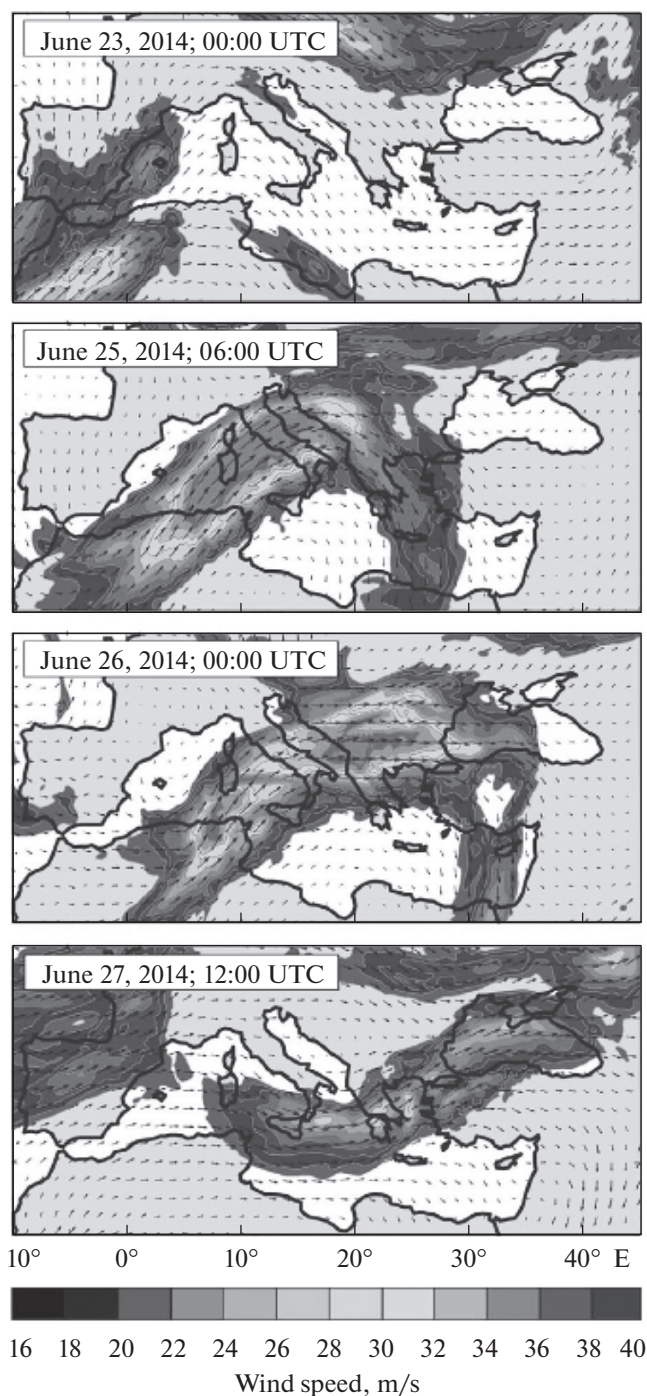


Рис. 4. Карты распространения струйного течения (со скоростью ветра более 20 м/с) на высоте около 500 ГПа (модифицированный рис. из работы [3]) во время метеоцунами 2014 г.

ния (см. модифицированный рис. 4 из работы [3]). Далее, 22 и 23 июля имеет место четкое нарастание интенсивности возмущений в указанном диапазоне, причем становится заметным появление коротких периодов. С 23 на 24 июля регистрируется некоторый спад интенсивности ионосферных возму-

щений в том же диапазоне, что соответствует спаду амплитуды колебаний атмосферного давления и уровня моря (ср. рис. 2). При этом проявляется интенсификация колебаний на коротких периодах. Начиная с 25 июля, в вариациях ТЕС не отмечено возрастания интенсивности колебаний рассматриваемого диапазона. Это вполне соответствует тому, что атмосферный скачок давления уже сместился в северо-восточном направлении (см. рис. 4).

Рассмотрим теперь пару станция–спутник lamp-prn2. Проекция траектории спутника в этом случае проходит восточнее Балеарских островов (см. рис. 1), но западнее о. Сардиния, куда после 23 июля успел переместиться скачок атмосферного давления (см. рис. 4). Спутник prn2 находился над акваторией в интервале 02–03 UT. Именно в это время 23–24 июля отмечен (см. рис. 5) резкий рост интенсивности вариаций ТЕС в диапазоне периодов 10–30 мин (21 и 22 июля это не наблюдалось). Эти особенности развития ионосферных возмущений соответствуют спектрам колебаний атмосферного давления и уровня моря, зарегистрированным на ст. Ninfa и Lampedusa (Италия, см. рис. 2). К 25 июля нестабильная область в атмосфере оказалась восточнее о. Сардиния, а проекция траектории заметно отклонилась в противоположную сторону. Поэтому возмущения в диапазоне периодов 10–30 мин для этой проекции траектории уже не наблюдались.

Вместе с тем развитие возмущений в ионосфере в это время хорошо прослеживается на паре pot1-prn19. Проекция траектории для этой пары также показана на рис. 1. Заметим, что эта проекция проходила над акваторией достаточно удачным образом. Поэтому вполне ожидаемо вариации ТЕС в диапазоне 10–30 мин наблюдались практически на протяжении всего анализируемого периода с 22 по 27 июля (в интервале от 18 до 22 UT). Подтверждение этого предположения видно из рис. 6. Аналогичная эволюция спектра возмущений наблюдалась и для пары lamp-prn19 (не показано).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод: имеет место соответствие спектральной картины (в диапазоне периодов 10–30 мин) на трех уровнях одного и того же региона: на уровне моря, в атмосфере (на высоте 500 ГПа) и в ионосфере (F-слой) в период развития метеоцунами. Это позволяет сделать предположение о возможной связи этих процессов.

В частности, событие, произошедшее в ночные часы 22–23.06.2014, выразилось во внезапной активизации колебаний атмосферного давления и уровня моря в бухте Сьютаделья (см.

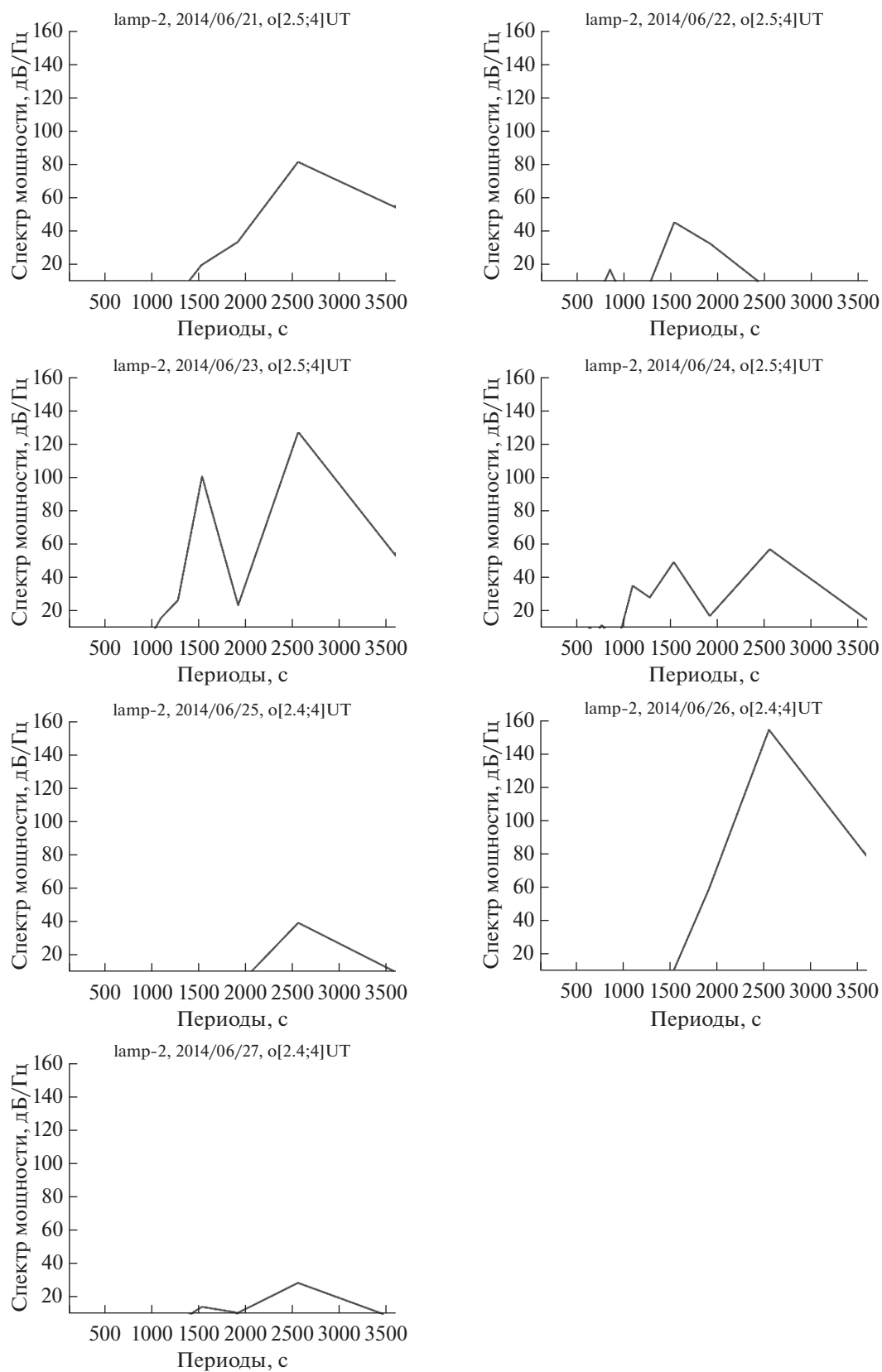


Рис. 5. Эволюция спектральной плотности мощности для пары станция—спутник lamp-prn2.

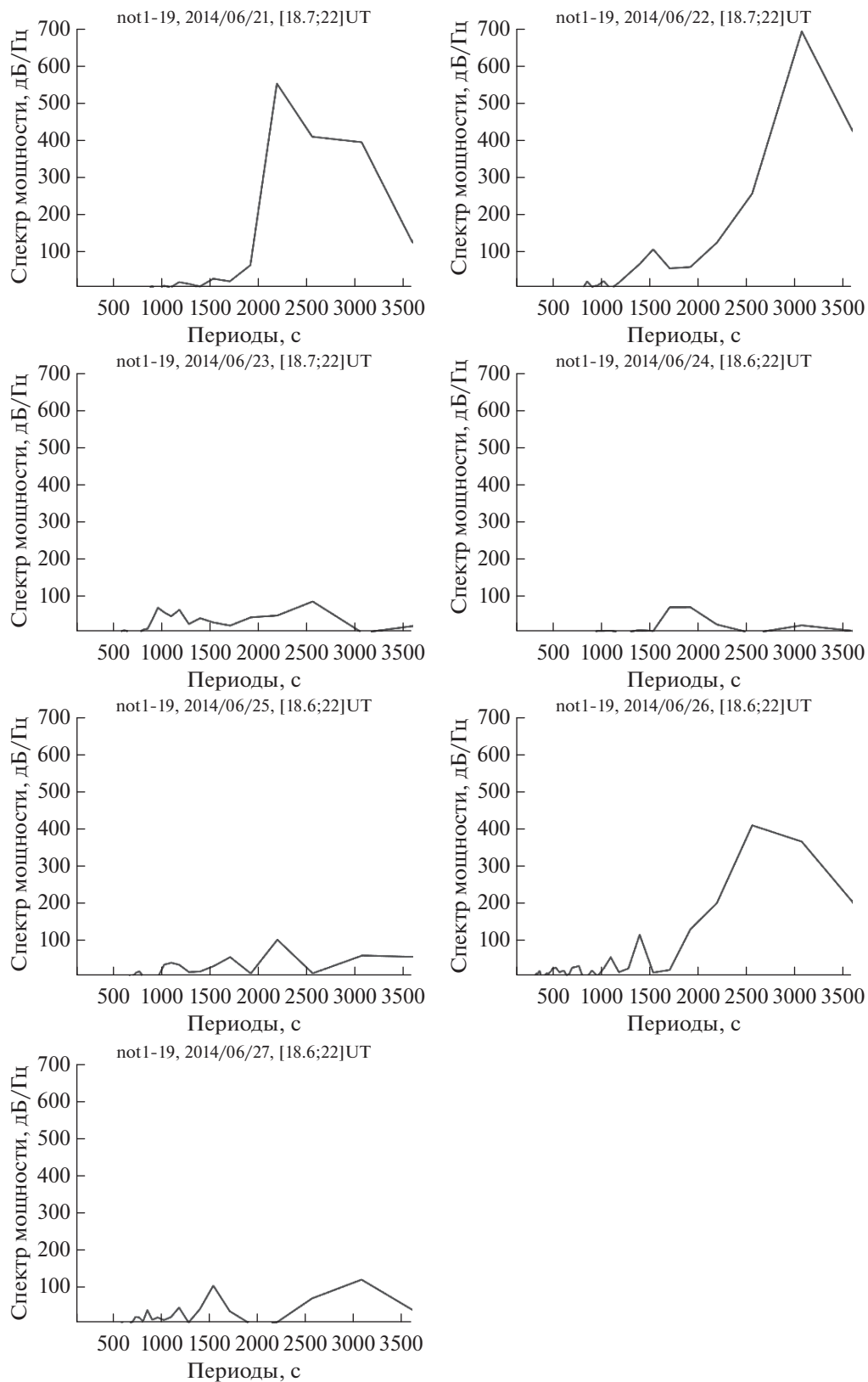


Рис. 6. Эволюция спектральной плотности мощности для пары станция–спутник not1-prn19.

рис. 2). Обращает на себя внимание сходство спектральной картины этих возмущений в интервале 10–30 мин. Близкая спектральная картина наблюдается и в вариациях ТЕС, причем интенсификация ионосферных возмущений в указанном диапазоне может быть обусловлена распространением предполагаемого источника в атмосфере. Как уже было отмечено, по мере распространения атмосферного источника через акваторию Средиземного моря спектр возмущений ТЕС в диапазоне 10–30 мин эволюционирует от длиннопериодных вариаций в сторону короткопериодных (см. рис. 3б), хотя и с заметным понижением их интенсивности. После прохождения предполагаемого атмосферного источника ионосферные возмущения в диапазоне 10–30 мин затухают. Следует отметить, что спектры за 20 и 30 июня, которые были выбраны в качестве фоновых для рассматриваемого события, также демонстрируют практическое отсутствие возмущений в указанном диапазоне. Отмеченную эволюцию спектральной картины можно наблюдать в ионосфере и при распространении цунами после землетрясений [5]. Таким образом, возникает вопрос о действительном источнике вариаций в ионосфере: это атмосфера и/или непосредственно метеоцунами?

Как было отмечено во Введении, метеоцунами — это длинные океанские волны, распространяющиеся с фазовой скоростью меньшей скорости звука и достигающие по амплитуде нескольких метров, как и обычные цунами. В пределе длинных волн имеем $k_x D \ll 1$, где k_x — волновое число в направлении распространения, D — средняя глубина океана. Это условие выполнено для океана с $D \approx 4$ км и длиной волны цунами $\lambda_x \approx 100$ –200 км. Такое же условие выполнено и для

Средиземного моря с $D \approx 60$ м (Балеарский шельф) и длиной волны метеоцунами $\lambda_x \approx 20$ –30 км. Следовательно, подобно цунами, обусловленным землетрясениями [6], метеоцунами, в принципе, могут генерировать ВГВ, которые, в свою очередь, оказывают воздействие на ионосферу. Однако разделить вклад в ионосферное возмущение атмосферного источника от предполагаемого вклада метеоцунами методом, используемым в данной работе для регистрации возмущений, достаточно трудно. Одним из способов такого разделения может стать привлечение дополнительной информации (например, учет резонансных условий при генерации метеоцунами).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Яуза-К., 2005. 360 с.
2. Monserrat S., Vilibic I., Rabinovich A.B. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2006. V. 6. P. 1035–1051.
3. Sepic J., Vilibic I., Rabinovich A.B., Monserrat S. Widespread tsunami-like waves of 23–27 June in the Mediterranean and Black Seas generated by high-altitude atmospheric forcing // Sci. Rep. 2015. V. 5. 11682. <https://doi.org/10.1038/srep11682>
4. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Институт Солнечно-земной физики СО РАН. 2006. 480 с.
5. Шалимов С.Л., Нестеров И.А., Воронцов А.М. О возмущениях ионосферы, регистрируемых посредством GPS после землетрясения и цунами в Тохоку 11.03.2011 // Физика Земли. 2017. № 2. С. 1–12.
6. Голицын Г.С., Кляцкин В.И. Колебания в атмосфере, вызываемые движениями земной поверхности // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1967. Т. 3. № 10. С. 1044–1052.

On Ionospheric Variations Recorded by GPS during Meteotsunami

S. L. Shalimov^{1, 2, *} and E. V. Olshanskaya¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, ul. Bol'shaya Gruzinskaya, 10, Moscow, 123242 Russia

²Space Research Institute Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya, 84/32, Moscow, 117997 Russia

*e-mail: pmsk7@mail.ru

Ionospheric disturbances recorded by GPS satellites on June 21–27, 2014 over Mediterranean sea during meteotsunami is considered. It was shown that during the event the intensification of disturbances in the upper atmosphere of this region can be observed with spectrum similar to ones of ground pressure variations and almost simultaneous variations of sea level (meteotsunami). The conclusion was made about possible relationship of the ionospheric response and the process of meteotsunami development.

Keywords: meteotsunami, GPS, internal gravity waves