

УДК 533.951

## СИНХРОННЫЕ ВАРИАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СОЛНЕЧНОГО ТЕРМИНАТОРА

© 2019 г. Ю. С. Рыбнов<sup>1</sup>, \*, С. П. Соловьев<sup>1</sup>, \*\*

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН), г. Москва, Россия

\*e-mail: rybnov.y@mail.ru

\*\*e-mail: soloviev@idg.chph.ras.ru

Поступила в редакцию 08.05.2018 г.

После доработки 24.09.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Приводятся данные натурных наблюдений вариаций давления и напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы при прохождении утреннего солнечного терминатора в различных регионах на территории РФ: на Камчатке, Кольском полуострове и Владимирской области. Анализ полученных данных показал, что при прохождении солнечного терминатора возникают синхронные вариации давления и напряженности электрического поля. Был выделен ряд событий, когда коэффициент взаимной корреляции вариаций давления и напряженности электрического поля в период прохождения солнечного терминатора превышал значение 0.9 с последующим уменьшением до фоновых значений  $\approx 0.2$ – $0.3$ .

DOI: 10.1134/S0016794019020123

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечный терминатор (СТ) как регулярное природное явление представляет интерес для изучения различных свойств атмосферы, которые проявляются при достаточно резком изменении потока солнечной радиации. СТ представляет собой граничную область между освещенной областью атмосферы и находящейся в тени с резкими градиентами параметров атмосферы, таких как температура, давление, плотность и др. Движение этой области обуславливает генерацию неоднородных структур атмосферы, включая ионосферу [Сомсиков и Троицкий, 1975]. Эта область имеет конечную ширину в пространстве. Ее параметры зависят от географической широты и высоты над поверхностью Земли. Генерируемые возмущения атмосферы отличаются в периоды восхода и захода Солнца [Сомсиков, 1983]. В момент прохождения СТ увеличиваются колебания атмосферных параметров практически на всех высотах, при этом условия генерации волн терминатором зависят как от суточных, так и сезонных вариаций параметров атмосферы в конкретной точке [Антонова и др., 1988]. Следует отметить, что возникновение неоднородностей в среде, содержащей электрически заряженные частицы, приводит к протеканию электродинамических процессов, проявляющихся в возмущениях электрического и

магнитного поля. Исследования, проводившиеся в последние два десятилетия, позволили выявить ряд плазменных неустойчивостей, которые ответственны за образования неоднородных структур в ионосфере и магнитосфере, обнаружить с помощью сети приемников GPS волновые пакеты, связанные с прохождением СТ, а также возбуждение вариаций магнитного поля [Афраймович и др., 2010; Сомсиков, 2011; Козлов и др., 2012].

В ряде работ было показано, что в результате движения СТ происходит генерация атмосферных волн на различных высотах в широком диапазоне частот [Антонова и др., 1988; Лизунов и Федоренко, 2006; Afraimovich, 2008; Afraimovich et al., 2009; Сомсиков, 2011; Салихов и др., 2013; Борчевкина и др., 2016]. Интерес к изучению распространения акустико-гравитационных волн (АГВ) при прохождении СТ обусловлен попытками привлечения таких волн к выявлению и объяснению связей динамических процессов в нижних и верхних слоях атмосферы [Laštovichka, 2006; Yiğit et al., 2016]. Особый интерес в этом случае представляют АГВ на частоте Брента–Вайсяля (Б–В), которые способны распространяться практически вертикально [Fritts and Alexander, 2003; Yiğit and Medvedev, 2015]. Характерными частотами для АГВ в атмосфере являются следующие

щие: предельная акустическая частота, или резонансная частота атмосферы для акустической моды и частота Брента–Вяйсяля (Б–В), или частота резонанса смещенного объема воздуха. Эти частоты являются границей раздела между акустическими и внутренними гравитационными волнами. Для стандартной атмосферы предельная акустическая частота,  $\omega_a$ , и частота Б–В,  $\omega_N$ , принимают значения:  $\omega_a = 0.02$  рад/с, или 0.0032 Гц и  $\omega_N = 0.018$  рад/с, или 0.0029 Гц [Хргиан, 1978]. В работе [Борчевкина и др., 2016] приведены результаты экспериментальных исследований АГВ в нижней атмосфере с применением атмосферного лидара при прохождении солнечного терминатора. Установлено повышение амплитуд вариаций параметров нижней атмосферы с периодами от 2 до 10 минут при прохождении СТ над пунктом наблюдений. Показано, что генерация АГВ на частоте Б–В происходит с некоторым временным запаздыванием и усилением последующей волновой активности.

В работе [Салихов и др., 2013] приведены результаты измерений микропульсаций атмосферного давления в горах Заилийского Алатау (радиополигон “Орбита”) на высоте 2750 м над уровнем моря. Во время прохождения СТ обнаружены микропульсации атмосферного давления с периодами 5.5–8.3 мин и амплитудами 6–11 Па. Возмущения в микропульсациях атмосферного давления длятся примерно 1.5–2 ч после прохождения СТ. Обращает на себя внимание тот факт, что выделение вариаций давления, обусловленных прохождением СТ, представляется весьма непростой задачей из-за влияния локальных метеорологических условий и наложения волн от других источников. В процитированной выше работе поиск характерных возмущений атмосферного давления во время прохождения СТ осуществлялся в “спокойные дни”, когда фоновая амплитуда пульсаций давления не превышала единиц Паскалей для периодов колебаний от сотен секунд до 1100–1200 с. В возмущенные дни амплитуда пульсаций давления могла достигать 50 Па и более. Увеличение амплитуды пульсаций давления свойственны приземной атмосфере при воздействии на нее нерегулярных источников, к которым относятся атмосферные фронты, ветер, грозы и др., а также ряд техногенных источников.

Эффект восхода Солнца оказывает заметное влияние и на характер изменений напряженности атмосферного электрического поля [Чалмерс, 1974; Marshall et al., 1999]. Так, на суточных записях вертикальной компоненты напряженности электрического поля,  $E_z(t)$ , полученных в Геофизической обсерватории Михнево (ГФО Михнево) ИДГ РАН в условиях “хорошей погоды”, эффект восхода Солнца проявляется достаточно отчетли-

во: величина  $E_z$  начинает возрастать после восхода, с некоторым запаздыванием достигает максимума и затем к полудню уменьшается [Соловьев и др., 2017]. Как было показано в работах [Marshall et al., 1999; Михайлова и др., 2013] и ряде других исследований, утренний максимум суточного хода электрического поля обусловлен интенсификацией конвективных процессов в атмосфере при возрастании температуры поверхности Земли на восходе Солнца.

В работах [Кузнецов и Чернева, 2008; Михайлова и др., 2013] обсуждался вопрос связи возмущений  $E_z(t)$  и акустико-гравитационных волн на восходе Солнца. В работе [Михайлова и др., 2013] исследовались спектральные характеристики вариаций  $E_z(t)$  как в течение суток, так и на восходе Солнца. При этом было показано, что на восходе Солнца интенсивность колебаний  $E_z(t)$  с периодами ~2–2.5 ч заметно возрастает, и одновременно усиливаются колебания в полосе периодов <1 ч. Однако в этих работах не проводилось синхронной регистрации вариаций давления и электрического поля. В работе [Соловьев и др., 2017] приведен пример синхронной регистрации вариаций давления и напряженности электрического поля, характерные волновые возмущения этих полей на записях соответствуют времени прохождения СТ. Измерения проводились в ГФО Михнево в условиях “хорошей погоды”, при этом было отмечено, что за все время наблюдений было зарегистрировано только несколько таких случаев. Анализ спектров вариаций давления показал, что амплитуда главного максимума приходится на диапазон частот близких к оценке частоты Б–В для условий проведения наблюдений и соответствует значению  $\approx 0.0027$  Гц.

Целью данной работы является исследование синхронных колебаний давления и напряженности электрического поля, которые были зарегистрированы во время проведения наблюдений на Камчатке, Кольском полуострове и Владимирской области. Основное внимание уделено изучению волновых форм вариаций давления и напряженности электрического поля при прохождении утреннего СТ методом взаимно корреляционного анализа.

## 2. АППАРАТУРА И МЕТОДЫ

Наблюдения за вариациями атмосферного давления и напряженностью электрического поля в приземном слое атмосферы проводились: на Камчатке, на территории obs. Паратунка ИКИР ДВО РАН (N = 52°58.3; E = 158°14.9); на Кольском полуострове, на территории Верхнетуломского радиофизического полигона ПГИ (N =

= 68°30.5; E = 31°34.6); во Владимирской обл. в пункте с координатами: N = 55°76.2; E = 41°75.1.

Для измерений использовалась аппаратура и методики мониторинга геофизических полей, разработанные в институте динамики геосфер (ИДГ РАН), эти приборы в течение многих лет использовались во время экспедиционных работ в различных регионах и разнообразных климатических условиях. В настоящее время данная аппаратура используется в Центре геофизического мониторинга ИДГ РАН [Спивак и др., 2016]. Регистрация вариаций давления осуществлялась тензометрическим датчиком абсолютного давления ДПМ-760 и инфразвуковой станцией. Датчик ДПМ-760 предназначен для работы в диапазоне величин давления от 790 до 1150 ГПа с разрешением 1–2 Па и частотном диапазоне от 0 до 10<sup>3</sup> Гц. В состав инфразвуковой станции входят микробарометры МБ-03, позволяющие регистрировать изменения давления от 0.05 до 200 Па в полосе частот 0.001–20 Гц. Регистрация вариаций напряженности электрического поля проводилась с помощью электростатических флюксометров ИНЭП (измеритель напряженности электрического поля) в частотном диапазоне 0–20 Гц и динамическом диапазоне 1–5000 В/м. Датчик давления, микробарометры и датчики электрического поля располагались на открытых площадках, расстояния от мест их установки до ближайших сооружений (дома, сараи, ангары и т.д.) было не менее десяти наибольших габаритов данного сооружения (высота, ширина). Для снижения ветрового фона микробарометры устанавливались в приямки глубиной 0.5 м. Для защиты от дождя приямки закрывались экранами с отверстиями. Одновременно с регистрацией пульсаций давления и напряженности электрического поля проводился контроль за метеопараметрами с использованием автоматической метеостанции DavisVantagePro2.

Сбор данных проводился с помощью многоканального аналого-цифрового преобразователя ZET-220, который преобразует аналоговое напряжение на выходе датчиков в цифровую форму с разрядностью 24 бит. В процессе измерений частота дискретизации обычно составляла 50 Гц. Синхронизация записей и привязка к точному времени осуществлялась от приемника GPS.

### 3. АНАЛИЗ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. На территории obs. Паратунка наблюдения за вариациями давления и электрического поля проводились с 05.09.2011 г. по 05.10.2011 г. В процессе анализа полученных данных, для выявления синхронных колебаний давления и на-

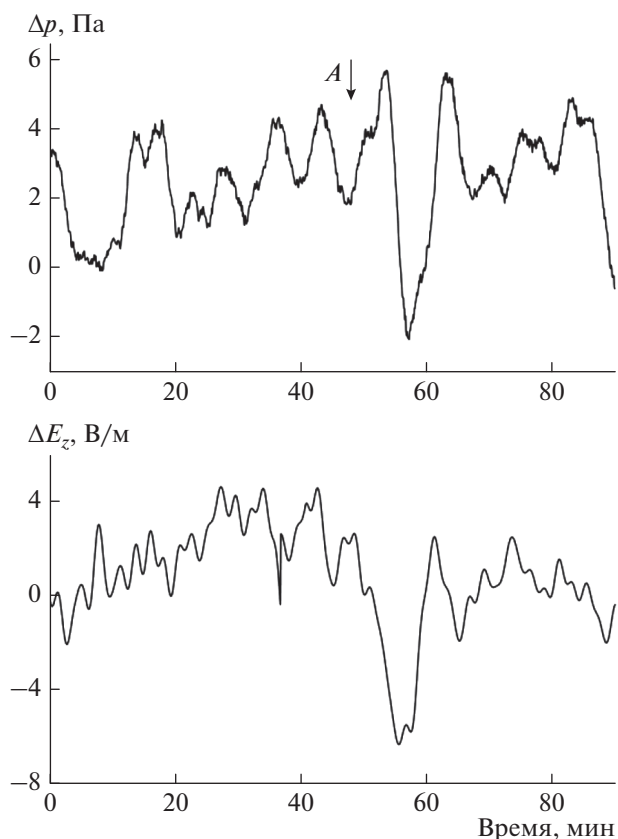
пряженности электрического поля, отбирались дни, когда соблюдались условия “хорошей погоды”, т.е. влияние неблагоприятных метеорологических явлений в эти дни было минимально (скорость ветра менее 1 м/с, относительно низкая влажность, отсутствие облачности и т.д.). В эти дни фоновая амплитуда пульсаций давления не превышала единиц Паскалей. Для других дней, когда эти условия не выполнялись, при скоростях ветра больших 3 м/с амплитуда фоновых пульсаций давления, как правило, превышала 10 Па.

В процессе обработки данных наблюдений процедура выявления синхронных сигналов была следующей. Выбирались 10 часовые интервалы записей, включающие 4 ч до прихода СТ и 6 ч после его прохождения. При этом из полученных рядов данных были удалены постоянные составляющие и анализировались вариации давления и напряженности электрического поля. Один из фрагментов записи вариаций давления,  $\Delta p(t)$ , и электрического поля,  $\Delta E_z(t)$ , при прохождении СТ 07 сентября 2011 г. приведен на рис. 1. Как видно из рисунка, на записях  $\Delta p(t)$  и  $\Delta E_z(t)$  прохождение СТ сопровождается характерным импульсом с периодом  $\approx 15$  мин. Время прохождения СТ 07.09.2011 г в районе obs. Паратунка ИКИР соответствует  $\approx 18:47$  UT (на рис. 1 время начала фрагмента записи 18:00 UT). Изменение спектральной плотности вариаций давления,  $S_p$ , и напряженности электрического поля,  $S_E$ , в зависимости от периода,  $T$ , для фрагмента записи сигналов 07 сентября 2011 г. при прохождении СТ представлено на рис. 2. Основной спектральный максимум как для вариаций давления, так и для напряженности электрического поля приходится на частоту 0.00111 Гц, что соответствует периоду  $\approx 15$  мин. Поэтому представляет интерес определение степени взаимосвязи между этими процессами.

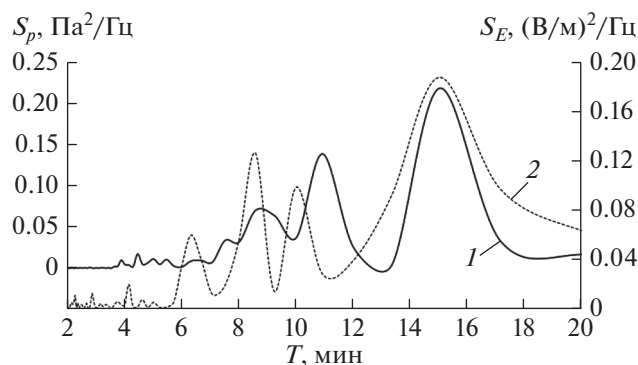
Исходные данные фильтровались в полосе частот 0.0033–0.00088 Гц (5–18 мин). Выбор данного частотного диапазона обусловлен поиском сигналов на частотах близких к частоте Б–В, что отмечалось в ряде работ [Fritts and Alexander, 2003; Сомских, 2011; Борчевкина и др., 2016]. Выше было приведено значение частоты Б–В для стандартной атмосферы  $\omega_N = 0.0029$  Гц, это значение соответствует периоду  $\approx 6$  мин. Однако, частота Б–В не является постоянной величиной и зависит от термодинамических параметров атмосферы, что видно из выражения

$$\omega_N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz} = g \frac{\gamma_a - \gamma_b}{T_1},$$

где  $\gamma_a$  – сухоадиабатический градиент температуры;  $\gamma_b$  – влажноадиабатический градиент температуры;  $T_1$  – характерная (средняя) температура



**Рис. 1.** Фрагмент записи вариаций давления,  $\Delta p(t)$ , и напряженности электрического поля,  $\Delta E_z(t)$ , при прохождении СТ в районе обс. Паратунка за 07 сентября 2011 г. Время начала фрагмента записи соответствует 18:00 UT. *A* – момент прохождения СТ, 18:47 UT.



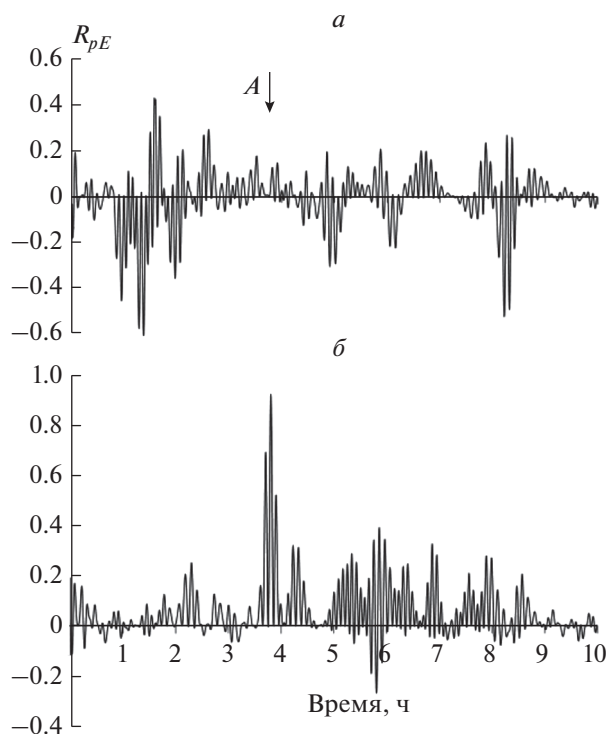
**Рис. 2.** Изменение спектральной плотности вариаций давления,  $S_p$  (1), и напряженности электрического поля,  $S_E$  (2), в зависимости от периода,  $T$ , для фрагмента записи сигналов 07 сентября 2011 г. в период прохождения СТ.

рассматриваемого слоя атмосферы. При изменении температуры и влажности атмосферного воздуха частота Б–В может заметно сдвинуться в сторону более низких частот.

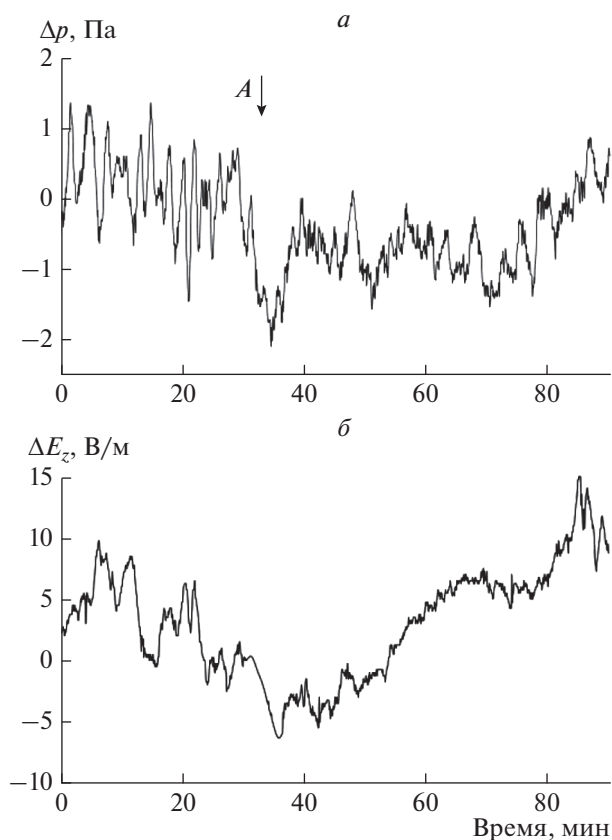
Для полученных после фильтрации рядов рассчитывался коэффициент взаимной корреляции,  $R_{pE}$ , в скользящем 30 минутном временном окне [Любушин, 2007]. На рисунке 3б приведен пример такого анализа за 07 сентября 2011 г. Видно, что прохождение СТ сопровождается высокой взаимной корреляцией вариаций давления и напряженности электрического поля (значение коэффициента взаимной корреляции  $R_{pE}$  составляет  $\approx 0.92$ ).

Однако, даже при наличии условий “хорошей погоды”, не всегда удается обнаружить сигналы с высокой степенью взаимной корреляции. На рисунке 3а приведен график изменения коэффициента взаимной корреляции со временем для 10 часового интервала 08 сентября 2011 г. Как видно из этого рисунка коэффициент взаимной корреляции не превышал значений 0.4–0.6, что говорит об отсутствии статистически значимой связи анализируемых рядов данных. В этом случае можно считать, что прохождение СТ не сопровождалось генерацией синхронных колебаний давления и напряженности электрического поля. Необходимо отметить, что на некоторых записях сигналов давления и электрического поля можно визуально выделить фрагменты довольно близкого совпадения колебаний увеличенной амплитуды в момент прохождения СТ, тем не менее взаимно корреляционный анализ этих фрагментов не дает статистически значимой связи анализируемых данных. За весь период наблюдений на территории обс. Паратунка было зарегистрировано три случая генерации синхронных колебаний давления и напряженности электрического поля, для которых коэффициент взаимной корреляции превышал значение 0.9. Наряду с этим был зарегистрирован целый ряд событий синхронных колебаний давления и напряженности электрического поля, когда коэффициент взаимной корреляции находился в диапазоне 0.7–0.8. Такие значения коэффициента взаимной корреляции можно также отнести к взаимосвязанным событиям.

3.2. Наблюдения за вариациями давления и напряженности электрического поля на территории Верхнетуломского радиофизического полигона проводились с 05.11.2011 г. по 12.11.2011 г. Также как и в предыдущем случае первоначально анализировались метеорологические данные и отбирались дни, когда выполнялись условия “хорошей погоды”. Затем проводилась фильтрация и корреляционный анализ вариаций давления и напряженности электрического поля. В итоге, за все время наблюдений было обнаружено только одно событие 07 ноября 2011 г., когда во время прохождения СТ коэффициент взаимной корреляции вариаций давления и напряженности электри-



**Рис. 3.** Изменение коэффициента взаимной корреляции,  $R_{pE}$ , вариаций давления и напряженности электрического поля со временем в течение суток 08.09.2011 (а) и 07.09.2011 (б). Начало фрагментов записей выбранных для анализа соответствовало 15:00 UT. А – время прохождения СТ (18:47 UT).



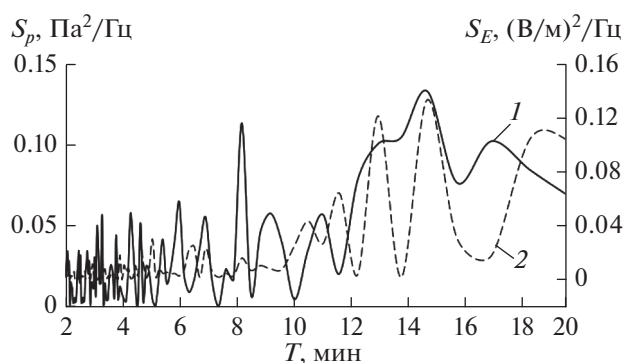
**Рис. 4.** Фрагмент записи вариаций давления,  $p(t)$ , и напряженности электрического поля,  $E_z(t)$ , при прохождении СТ в районе Верхнетуломского радиофизического полигона 07 ноября 2011 г. Время начала фрагмента записи соответствует 06:00 UT. А – момент прохождения СТ, 06:33 UT.

ческого поля превышал значение 0.9. На рисунке 4 показаны волновые формы зарегистрированных сигналов, а на рис. 5 их спектры мощности. Основной спектральный максимум для вариаций давления и напряженности электрического поля на рис. 5 приходится на период  $\approx 15$  мин.

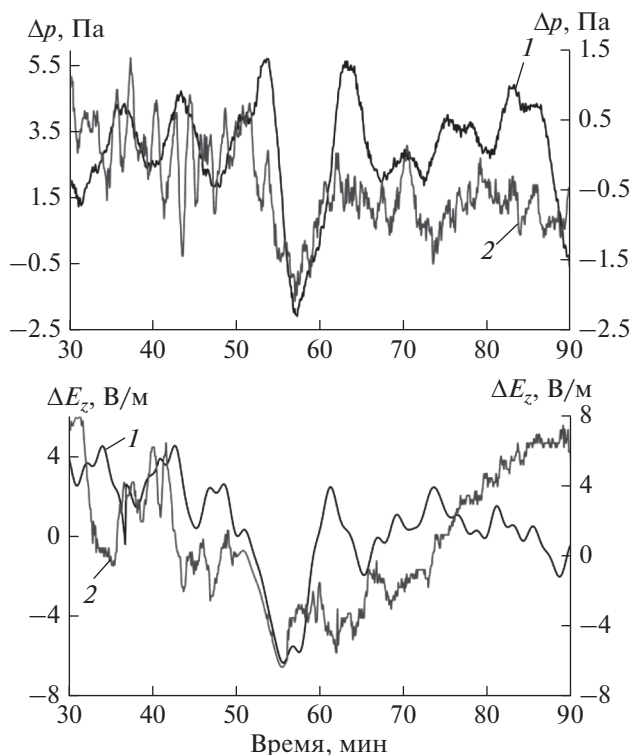
При сравнении сигналов, представленных на рис. 1 и 4 следует отметить, что прохождение утреннего СТ сопровождается характерным импульсом как на записях вариаций давления, так и напряженности электрического поля. Для более детального сравнения, на рис. 6 показаны совмещенные волновые формы вариаций давления и напряженности электрического поля, зарегистрированные в районе obs. Паратунка и на территории Верхнетуломского радиофизического полигона в период прохождения СТ. Из рисунка 6а и 6б видно хорошее совпадение в форме импульсов, возникающих непосредственно после прохождения СТ, при этом положение основного спектрального максимума (рис. 2 и рис. 5) для вариаций давления и напряженности электрического поля приходится практически на одну и ту же частоту.

3.3. Во Владимирской области наблюдения за вариациями давления и напряженности электрического поля проводились с 08.06.2012 г. по 17.06.2012 г. За весь период наблюдений был зарегистрирован один случай генерации синхронных колебаний давления и напряженности электрического поля, для которых коэффициент взаимной корреляции превышал значение 0.9.

Как показал анализ экспериментальных данных, прохождение утреннего СТ сопровождается возникновением вариаций давления характерной формы в пунктах наблюдений, расположенных в различных географических районах. На рисунке 7 приведены волновые формы колебаний давления, зарегистрированные в 4-х пунктах наблюдений: на Камчатке (на территории obs. Паратунка ИКИР ДВО РАН), на Кольском полуострове (на территории Верхнетуломского радиофизического полигона ПГИ), во Владимирской обл., в горах Заилийского Алатау на высоте 2750 м на радиополигоне “Орбита”. На рисунке 7в приведены вариации давления, которые были адаптированы



**Рис. 5.** Изменение спектральной плотности вариаций давления,  $S_p$  (1), и напряженности электрического поля,  $S_E$  (2), в зависимости от периода,  $T$ , для фрагмента записи сигналов 07 ноября 2011 г. при прохождении СТ.



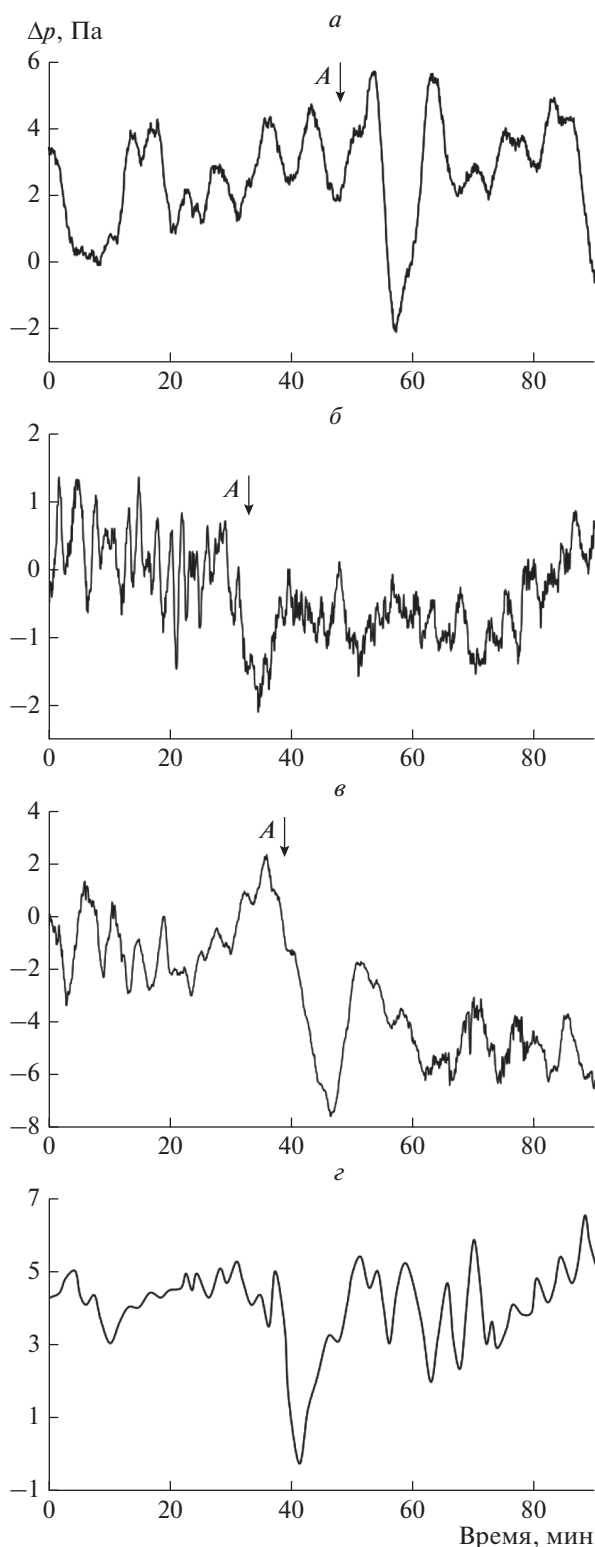
**Рис. 6.** Совмещенные волновые формы вариаций давления,  $\Delta p$ , и напряженности электрического поля,  $\Delta E_z$ . Сигналы зарегистрированы в обс. Паратунка (кривая 1, левая ось значений) и на территории Верхнетулумского радиофизического полигона (кривая 2, правая ось значений).

к данному масштабу из работы [Салихов и др., 2013]. Начало колебаний соответствует времени прохождения СТ (на рисунке этот момент отмечен стрелками, кроме рис. 7г, в силу специфических условий регистрации этот момент сдвинут на 1 ч). Видно, что структура волновых цугов в

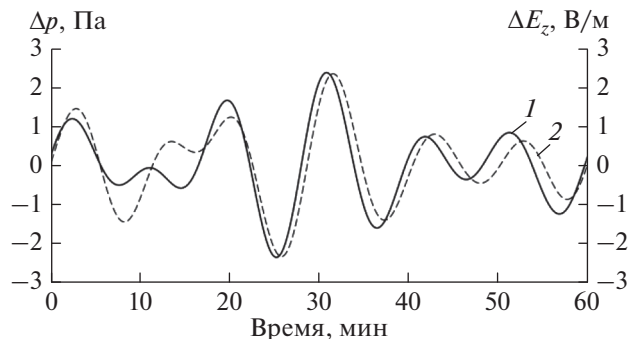
каждом из пунктов наблюдений имеет подобную форму. При этом период колебаний находится в диапазоне 5–18 мин. Наиболее наглядно структура волнового цуга при прохождении СТ, представлена на рис. 8. На рисунке для часового интервала времени, включающего прохождение утреннего СТ, приведены волновые формы вариаций давления и напряженности электрического поля после фильтрации в диапазоне периодов 5–18 мин. Коэффициент взаимной корреляции вариаций давления и напряженности электрического поля в период прохождения СТ достигает  $\approx 0.92$  с последующим уменьшением до фоновых значений  $\approx 0.2$ – $0.3$ . Длительность волнового цуга, когда значения коэффициента взаимной корреляции находятся в пределах 0.7–0.9, соответствуют приблизительно четырем волновым периодам. В других случаях зарегистрированных синхронных колебаний давления и напряженности электрического поля длительность волнового цуга также составляет 3–5 волновых периодов.

Данное обстоятельство представляет интерес для сравнения со структурой волновых возмущений на терминаторе, обнаруженных при анализе данных спутника Atmosphere Explorer-E на борту которого были установлены датчики как нейтральных, так и ионизированных атмосферных компонент [Лизунов и Федоренко, 2006]. Высота орбиты спутника составляла 250–300 км. Из анализа, проведенного в работе, следует, что в утренние часы после восхода Солнца и в вечерние после захода происходит усиление волновой активности, проявляющееся в квазипериодических вариациях плотности и температуры различных сортов атмосферных газов и свидетельствующее о генерации терминатором крупномасштабных атмосферных гравитационных волн. Эти квазипериодические вариации представляют собой волновой цуг длительностью 4–6 волновых периодов [Лизунов и Федоренко, 2006]. Таким образом, структура волновых цугов (количество волновых периодов) наблюдаемых при прохождении СТ в ионосфере и приземном слое атмосферы имеют общие черты.

В работе [Салихов и др., 2013] приведены пять записей пульсаций атмосферного давления во время восхода Солнца в период 1–10 июня 2001 г. (один из фрагментов пульсаций давления, адаптированных к соответствующему масштабу времени приведен на рис. 7в). Авторами была обнаружена задержка реакции приземной атмосферы на восход Солнца из-за закрытия пункта измерений горами. Время задержки реакции приземной атмосферы на прохождение СТ равно примерно одному часу. С другой стороны, если пункты наблюдений располагаются в равнинной местности, то характерный волновой цуг регистрируется практически сразу после прохождения СТ (рис. 7).



**Рис. 7.** Фрагменты записи вариаций давления при прохождении СТ. Сигналы зарегистрированы в 4-х пунктах наблюдений: (а) – на территории обс. Паратунка; (б) – на территории Верхнетуломского радиофизического полигона; (в) – территории Владимирской области; (г) – в горах Заилийского Алатау на радиополигоне “Орбита”, адаптировано из [Салихов и др., 2013]; А – время прохождения СТ.



**Рис. 8.** Вариации давления,  $\Delta p$  (1), и напряженности электрического поля,  $\Delta E_z$  (2), после фильтрации в полосе 9–18 мин в период прохождения СТ, район обс. Паратунка.

Это может свидетельствовать о том, что источник волновых возмущений находится в приземной атмосфере.

Возмущения поля давления и сопутствующие им возмущения электрического поля для случая акустических колебаний рассматривались в работах [Соловьев и Сурков, 1994; Соловьев и др., 2017]. Анализ экспериментальных данных показал, что наблюдается приблизительная пропорциональность амплитуды возмущений электрического поля и амплитуды изменения давления. Также были получены теоретические оценки возмущений напряженности атмосферного электрического поля, обусловленных распространяющейся акустической волной. Результаты оценок соответствуют величинам, зафиксированным при проведении наблюдений. Источником электрических возмущений являлась локальная область изменения давления в акустической волне. Увеличение плотности воздуха за фронтом волны и последующее ее уменьшение в фазе разряжения приводит к локальному изменению плотности объемного электрического заряда, которое проявляется в возмущениях электрического поля. В отличие от акустических возмущений для анализа вариаций давления на частотах Б–В и ниже необходимо учитывать действие гравитационных сил, т.е. волна становится двухкомпонентной. Но, возможно, и в данном случае подобный механизм вносит свой вклад – вариации давления приводят к изменениям плотности объемного электрического заряда в нижних слоях атмосферы, и как следствие, к изменению напряженности атмосферного электрического поля, вариации которого наблюдаются синхронно с вариациями давления.

## 4. ВЫВОДЫ

Представлены результаты экспериментальных исследований волновой активности приземного слоя атмосферы при прохождении утреннего солнечного терминатора, которые были получены в различных регионах на территории РФ – на Камчатке, Кольском полуострове и Владимирской области.

Анализ данных натурных наблюдений за вариациями давления и электрического поля показал, что во время прохождения утреннего терминатора, регистрируются синхронные низкочастотные колебания давления и напряженности электрического поля с периодами близкими к частоте Брента–Вайсяля. При этом, основной максимум в спектре вариаций электрического поля совпадает с аналогичным максимумом в спектре вариаций давления. Синхронные вариации давления и напряженности электрического поля удается выделить в условиях близких к “хорошей погоде”, когда влияние неблагоприятных метеорологических явлений сводится к минимуму. Важным обстоятельством является отсутствие влияния техногенных источников, как на электрическое поле, так и на поле давления.

В процессе обработки данных наблюдений использовался взаимно-корреляционный анализ волновых форм вариаций давления и напряженности электрического поля. Был выделен ряд событий, когда коэффициент взаимной корреляции вариаций давления и напряженности электрического поля в период прохождения СТ превышал значение 0.9 с последующим уменьшением до фоновых значений  $\approx 0.2$ – $0.3$ . Анализ волновых форм вариаций давления и напряженности электрического поля после фильтрации в диапазоне периодов 5–18 мин показал, что в период прохождения СТ возникают синхронные квазипериодические колебания давления и напряженности электрического поля представляющие собой цуг с длительностью 3–5 волновых периодов. В пределах волнового цуга значения коэффициента взаимной корреляции находятся в пределах 0.7–0.9. Наличие синхронных квазипериодических колебаний давления и напряженности электрического поля позволяет предположить, что такие вариации могут иметь один источник возбуждения, что может являться идентификационным признаком СТ.

Работа выполнена по государственному заданию, тема АААА-А17-117112350013-1.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Антонова В.П., Гусейнов Ш.Ш., Дробжнев В.И. и др., Комплексное экспериментальное исследование волн в атмосфере, генерируемое солнечным терминатором //

Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 24. № 2. С.134–143. 1988.

– Антонова В.П., Дунгенбаева К.Е., Зализовский А.В., Инчин А.С., Крюков С.В., Сомсиков В.М., Ямпольский Ю.М. Различие спектров акустико-гравитационных волн в дневные и ночные часы, обусловленное неравновесными эффектами в атмосфере // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 46. № 1. С. 106–114. 2006.

– Афраймович Э.Л., Едемский И.К., Воейков С.В., Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В. МГД природа ионосферных волновых пакетов, генерируемых солнечным терминатором // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 50. № 1. С. 82–99. 2010.

– Борчевкина О.П., Карнов И.В., Карнов А.И., Ильминская А.В. Акустико-гравитационные волны в наблюдениях тропосферных и ионосферных параметров над Калининградом // Proc. XXXIX Annual Seminar Physics of Auroral Phenomena, Apatity. P. 108–111. 2016.

– Козлов Д.А., Леонович А.С., Едемский И.К. Генерация медленных магнитозвуковых колебаний в плазмосфере земли солнечным терминатором // Солнечно-земная физика. Вып. 20. С. 63–71. 2012.

– Кузнецов В.В., Чернева Н.В. Исследование Форбуш понижений и эффектов терминатора в атмосферном электрическом поле на обсерватории Паратунка (Камчатка) // Вест. КРАУНЦ. Наука о Земле. Вып. 11. № 1. С. 89–97. 2008.

– Лизунов Г.В., Федоренко А.К. Генерация атмосферных гравитационных волн солнечным терминатором по данным измерений на спутнике “Atmosphere Explorer-E” // Радиофизика и астрономия. Т. 11. № 1. С. 49–69. 2006.

– Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука. 228 с. 2007.

– Михайлова Г.А., Капустина О.В., Смирнов С.Э. К вопросу о природе эффекта восхода Солнца в суточных вариациях напряженности электрического поля на Камчатке. 2. Частотные вариации электрического поля // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 53. № 2. С. 247–255. 2013.

– Салихов Н.М., Сомсиков В.М., Жумабаев Б.Т., Андреев А.Б. Восходные эффекты в микропульсациях атмосферного давления в горной местности. [http://nblib.library.kz/elib/library.kz/journal/Salixov\\_Somsikov\\_Jumabaev\\_Andreev.pdf](http://nblib.library.kz/elib/library.kz/journal/Salixov_Somsikov_Jumabaev_Andreev.pdf) / 2013.

– Соловьев С.П., Сурков В.В. Электрические возмущения в приземном слое атмосферы, обусловленные воздушной ударной волной // Физика горения и взрыва. Т. 30. № 1. С. 117–121. 1994.

– Соловьев С.П., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А., Крашенинников А.В. Акустико-гравитационные волны и сопутствующие им возмущения атмосферного электрического поля // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 57. № 3. С. 363–375. 2017.

– Сомсиков В.М., Троицкий Б.В. Генерация возмущений в атмосфере при прохождении через нее солнечного терминатора // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 15. № 5. С. 856–860. 1975.

– Сомсиков В.М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата: Наука. 193 с. 1983.



- *Сомиков В.М.* Солнечный терминатор и динамические явления в атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 6. С. 723–735. 2011.
- *Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А.* Аппаратура и методики для мониторинга геофизических полей мегаполиса и их применение в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН// Сейсмические приборы. Т. 52. № 2. С. 65–78. 2016.
- *Хргиан А.Х.* Физика атмосферы. Т. 1. Л.: Гидрометеоздат. 247 с. 1978.
- *Чалмерс Дж.А.* Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеоздат. 384 с. 1973.
- *Afraimovich E.L.* First GPS-TEC evidence for the wave structure excited by the solar terminator // Earth Planets Space. № 60. P. 895–900. 2008.
- *Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Voeykov S.V., Yasyukevich Yu.V., Zhivetiev I.V.* The first GPS-TEC imaging of the space structure of MS wave packets excited by the solar terminator // Ann. Geophys. V. 27. P. 1521–1525. 2009.
- *Fritt D.C., Alexander M.J.* Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // Rev. Geophys. V. 41. P. 1–64. 2003.
- *Laštovichka J.* Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmos. Solar. Terr. Phys. V. 68. P. 479–497. 2006.
- *Marshall T.C., Rust W.D., Stolzenburg M., Roeder W.P., Krehbiel P.R.* A study of enhanced fair-weather electric fields occurring soon after sunrise // J. Geophys. Res. V. 104(D20). P. 24455–24469. 1999.
- *Yiğit A., Medvedev A.* Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere // Adv. Space Res. V. 55. P. 983–1003. 2015.
- *Yiğit E., Knízova P.K., Georgieva K., Ward W.* A review of vertical coupling in the Atmosphere–Ionosphere system: Effects of waves, sudden stratospheric warmings, space weather, and of solar activity // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 141. P. 1–12. 2016.