УДК 551.51

# О СВЯЗИ ХАРАКТЕРИСТИК ГОДОВОГО ХОДА ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ВЫСОТЫ СЛОЯ Е-СПОРАДИЧЕСКОГО ИОНОСФЕРЫ С СЕЗОННЫМИ ПЕРЕСТРОЙКАМИ СТРАТОМЕЗОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ<sup>1</sup>

# © 2022 г. А. А. Куминов\*

Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, Первомайская, З, Долгопрудный, 141700 Россия

\**e-mail: airship@mail.mipt.ru* Поступила в редакцию 14.01.2022 г. После доработки 24.03.2022 г. Принята к публикации 11.04.2022 г.

Анализ временного хода действующих высот слоя E-спорадического ( $h'E_s$ ), определенных по ионограммам с повышенной точностью (1 км), выявил в средних широтах северного полушария следующие особенности годовых вариаций. Оказалось, что в зимний период внутри-сезонные средние значения  $h'E_s$  выше, чем летом. Размах внутрисезонных вариаций, которые наряду с шумом содержат колебания с периодами от нескольких суток до нескольких десятков суток, зимой также больше, чем летом. Следует отметить, что смены сезонных режимов происходят довольно быстро. Это обстоятельство, а также увеличение в зимнее время амплитуд вариаций с периодами, свойственными планетарным волнам, позволяют сделать предположение о связи сезонных переходов в поведении  $h'E_s$  с весенними и осенними перестройками циркуляции в средней атмосфере. С целью проверки этого предположения было проведено сопоставление результатов ракетных измерений зональной скорости ветра на высотах 20-80 км над Волгоградом (48°68 с.ш., 44°35 в.д.) с данными ионосферной станции Poitiers (46°6 с.ш., 0°3 в.д.) в 1984–1989 годах. Оказалось, что в 1984–1988 годах сроки весенней смены сезонных режимов поведения *h*'*E*<sub>S</sub> и перестройки стратомезосферной циркуляции с западной на восточную совпали, и только в 1989 году переход в ионосфере несколько опередил перестройку в средней атмосфере. Осенью смена сезонных режимов поведения  $h'E_{\rm S}$  в 1984-1989 годах всегда запаздывала относительно начала реверса зонального ветра в стратомезосфере на практически фиксированный интервал времени около двух месяцев.

**Ключевые слова:** слой Е-спорадический, циркуляция в средней атмосфере, годовые вариации, ракетное зондирование, радиозондирование ионосферы

DOI: 10.31857/S000235152204006X

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Слой Е-спорадический ( $E_s$ ) — уникальное явление в земной ионосфере. В отличие от регулярных слоев, в образовании которых основную роль играют фотохимические процессы, слой  $E_s$  обязан своим существованием (по крайней мере, в средних широтах) в первую очередь процессам динамическим [1, 2]. Это обстоятельство делает его измеряемые характеристики своего рода индикаторами динамических процессов в нижней термосфере. Малая толщина слоя  $E_s$  (от нескольких сот метров до двух километров) обеспечивает хорошее вертикальное разрешение при исследовании мелкомасштабных динамических процессов, а возможность точно определять высоту слоя

по его действующей высоте,  $h'E_S$  (при условии достаточно большой разности критических частот слоев  $E_S$  и регулярного E, например, в ночное время), дает высотную привязку изучаемого явления.

Поэтому неудивительно, что анализ временных вариаций  $h'E_S$  изначально применялся и применяется для поиска эффектов вертикального распространения внутренних гравитационных и планетарных волн (ПВ) от источников на земной поверхности и в нижней атмосфере в нижнюю термосферу и выше. Так, например, в [3–5] во временных рядах  $h'E_S$  и  $f_OE_S$  (критической частоты слоя  $E_S$ ) среднеширотных станций Иркутск (СССР) в 1984–1986 гг., Теһгап (Иран) в июле 2006 г.–июне 2007 г., Rome и Gibilmanna (Италия) в июне–сентябре 2013 года были обнаружены вариации с периодами, свойственными ПВ в тропосфере и нижней стратосфере. В [6] времен-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на Всероссийской конференции "Собственное излучение, структура и динамика средней и верхней атмосферы" (Москва, 22–23 ноября 2021 г.).

ные ряды  $h'E_S$  и  $f_OE_S$ , полученные на станции Pruhonice (Чехия) в летние сезоны 2004, 2006 и 2008 гг., сопоставлялись с временными рядами температуры нейтральной атмосферы на барическом уровне 10 hPa. Обнаружены когерентные ограниченные волнообразные всплески в спектрах с периодами, близкими периодам волн Россби. Такого рода когерентные всплески были также обнаружены в летних данных  $h'E_S$  и  $f_OE_S$  2009 года, полученных на станции Pruhonice, и, одновременно, во временных рядах измерений мезосферного ветра в Collm (Германия) и температуры на уровнях давления 10–0.1 hPa [7].

Естественно ожидать, что характер (и сама возможность) вертикального распространения волн зависит от физических свойств среды распространения, — конкретно, от свойств стратосферы и мезосферы. В [8] теоретически предсказана критическая зависимость возможности распространения от направления и величины скорости зонального ветра в стратомезосфере. Согласно расчетам, при летних ветрах, направленных с востока на запад, условия распространения ПВ в вертикальном направлении неблагоприятны — вплоть до блокировки волн в нижней атмосфере. Зимой при относительно умеренных западных ветрах можно ожидать проникновение ПВ в нижнюю термосферу и, возможно, выше.

Это обстоятельство позволило сформулировать задачу поиска сезонных особенностей в вариациях  $h'E_s$  и их связи с сезонными перестройками зональной циркуляции в среднеширотной стратомезосфере Северного полушария. Ниже приводятся результаты проведенного исследования. В качестве ионосферных данных использовались результаты вертикального зондирования ионосферы на станции Poitiers (46°6 с.ш.; 0°3 в.д.), Франция. Вертикальные профили скорости зонального ветра были получены из данных метеорологического ракетного зондирования на станции ракетного зондирования атмосферы (СРЗА) Волгоград (48°68 с.ш.; 44°35 в.д.).

# 2. АНАЛИЗ ИОНОСФЕРНЫХ ДАННЫХ

Хотя качество ионограмм позволяет определить значения действующей высоты слоя Е-спорадического с точностью не хуже 1-2 км, действующее руководство по обработке ионограмм, разработанное Международным научным радиосоюзом [9] допускает регистрацию значений  $h'E_s$  с точностью 5 км. Видимо, этим обстоятельством объясняется тот факт, что поиск высокоточных данных по  $h'E_s$  среди среднеширотных ионосферных станций северного полушария в архивах Мировых центров данных (МЦД) позволил обнаружить только один, сравнительно небольшой длительности, временной ряд данных по  $h'E_s$ , за-

писанных с точностью 1 км [10]. Это результаты наблюдений на станции Poitiers (Франция) в течение 1984—1989 гг. (Можно отметить, что наблюдения на станции Poitiers проводились с 1957 года, но только в 1984—1989 гг. значения *h'Es* снимались с точностью 1 км. После 1989 года данные этой станции перестали поступать в МЦД). Удачным совпадением является тот факт, что в эти же годы на расположенной на близкой по значению широте СРЗА Волгоград проводилось регулярное (не реже одного пуска в неделю) зондирование средней атмосферы метеорологическими ракетами.

На рис. 1 в качестве примера приведен временной ряд  $h'E_S$  для 1988 года. Хотя формат архивных файлов предусматривает хранение ежечасных значений ионосферных данных, вследствие природной нерегулярности появления слоя  $E_S$  в данном году получено только 3905 значений. Как и ряды других лет наблюдений, ряд 1988 года производит впечатление сильной "зашумленности", сквозь которую можно различить наличие, предположительно, годовой вариации. Сказать что-либо о свойствах "шума" по этому рисунку не представляется возможным.

Для более углубленного анализа временные ряды *h*'*E*<sub>S</sub> для каждого года наблюдений были разложены в ряды Фурье на годовом основном интервале. Здесь следует отметить, что снятые с ионограмм данные представляют собой дискретный временной ряд. Даже если наблюдения проводились непрерывно и данные представлены с постоянным шагом по времени, интегрирование по времени такого ряда (например, при Фурьеанализе) требует определенных представлений о ходе подынтегральной функции между последовательными точками. Подынегральная функция может аппроксимироваться ступенчатой функцией, кусочно-линейной, кусочно-полиномиальной и др. В настоящей работе используется кусочно-линейная подынтегральная функция. Именно она представлена на рис. 1. Очевидно, что значимых разрывов в ней (как и во временных рядах других лет) нет. Но поскольку слой  $E_S$  сам по себе – явление именно спорадическое, возможно его отсутствие в ионосфере в течение относительно небольших интервалов времени. Представление о частоте появлений  $E_S$  над станцией Poitiers дает тот факт, что в каждом исследуемом годовом интервале содержится не менее четырех тысяч значений *h'Es*. Кусочно-линейный характер аппроксимирующей функции, по сути дела, обеспечивает линейную интерполяцию отсутствующих ежечасных данных и, тем самым, выравнивание шагов по времени.

На рис. 2 в качестве примера приведен Фурьеспектр для 1988 года. Это типичный спектр, имеющий общие черты со спектрами других лет наблюдений. Резко выделяется группа линий с 1-ой



Рис. 1. Временной ряд ежечасных значений *h'Es* на ионосферной станции Poitiers (46°6 с.ш., 0°3 в.д.) в 1988 году.

по 5-ую гармонику, обязанная своим существованием годовому и, возможно, более длительным циклам вариаций *h*'*E*<sub>S</sub>. Хорошо выражена суточная гармоника. На частотах меньше суточной, но больше частот годовой группы на фоне "красного" шума выделяются своими амплитудами гармоники и группы гармоник с периодами от единиц до десятков суток. Сам по себе Фурье-анализ об их природе сказать ничего не позволяет. Однако можно предположить, что эти вариации  $h'E_s$ являются проявлением волн Россби, которые, при определенных условиях в средней атмосфере, могут распространяться вверх от источников, находящихся на земной поверхности и в нижней атмосфере. Чтобы проверить это предположение, полезно сначала в каждом годовом Фурье-спектре выделить ту область частот, которые соответствуют известным периодам планетарных волн, наблюдающихся в атмосфере Земли. В данной работе была выбрана область с периодами 2–30 суток (с 12-ой по 183-ью гармоники). Этот выбор позволяет отстроиться от "высокочастотного шума", каковым будут считаться вариации с суточным и меньшими периодами, и исключить искажающее влияние годовой вариации и возможного тренда.

На рис. 3 представлена сумма гармоник 12–183 для 1988 года, которая далее будет именоваться среднечастотной вариацией  $h'E_S$ . Оказывается, эта среднечастотная вариация обладает сезонной зависимостью: летом амплитуда заметно меньше, чем зимой. Что поддерживает предположение об обусловленности колебаний волнами Россби. Примерно такая же картина имеет место и в другие годы наблюдений. Причем смена внутри-сезонных режимов происходит в сравнительно короткие сроки, хотя визуально определить моменты переходов довольно сложно.





**Рис. 2.** Спектр Фурье-разложения временного ряда ежечасных значений  $h'E_S$  по данным ионосферной станции Poitiers в 1988 году.

Задача определения моментов смены сезонных режимов решалась с помощью математической статистики следующим образом. Сначала из временного ряда на рис. 3 создавался ряд абсолютных значений его членов – рис. 4. Затем полученный ряд аппроксимировался ступенчатой функцией, три ступени которой соответствовали, последовательно, зимне-весеннему, летнему и осенне-зимнему режимам среднечастотной вариации  $h'E_S$ , а моменты перехода со ступени на ступень интерпретировались, как моменты смены сезонов. Пять статистик – высоты трех ступеней и два момента смены режимов – определялись одновременно с помощью метода наименьших квадратов минимизацией дисперсии ряда абсолютных значений вариации относительно аппроксимирующей функции. Алгоритм решения заключался в полном переборе всех возможных моментов смены внутри-

6

5

сезонных режимов вариаций *h'Es* с соблюдением порядка следования весенней и осенней смен в течение года с шагом в одни сутки. На каждом шаге, как для весеннего момента, так и для осеннего момента вычислялись и запоминались средние значения модулей *h'Es* для трех сезонов (зимне-весеннего, летнего и осенне-зимнего). Сразу же вычислялась и запоминалась дисперсия модулей *h*'*Es* относительно образованной таким образом трехступенчатой функции времени. Результатом выполнения всех циклов по времени являлась треугольная матрица с полным набором значений дисперсий для всех допустимых пар моментов времени. Из нее выбирался элемент с минимальным значением. Соответствующие ему (запомненные) моменты времени и величины трех средне-сезонных величин h'Es полагались значениями искомых статистик. Описанный алгоритм обеспечивает по-



**Рис. 3.** Среднечастотная вариация *h*'*E*<sub>S</sub> (сумма гармоник Фурье-разложения с 12-ой по 183-ью) для станции Poitiers по данным 1988 года.

грешность определения дат смены режимов внутри-сезонных вариаций *h*'*Es* в пределах 0.5 суток.

Так, из рис. 4 следует, что смены режимов внутрисезонных вариаций в 1988 году произошли 10 апреля и 14 ноября.

Такого рода процедуры были проделаны для временных рядов каждого года. Результаты подтвердили существование двух режимов внутрисезонных вариаций в диапазоне средних частот: зимнего – с более высокими амплитудами – и летнего – с меньшими амплитудами.

### 3. СМЕНЫ РЕЖИМОВ ВНУТРИСЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ *h'Es* И СЕЗОННЫЕ ПЕРЕСТРОЙКИ ЦИРКУЛЯЦИИ В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ

В те же годы, в 1984—1989, на станции ракетного зондирования атмосферы Волгоград Центральной аэрологической обсерватории проводилось метеорологическое ракетное зондирование с высотой подъема головных частей до 80 км, с частотой пусков от 72 до 102 в год. Измерялись температура, горизонтальные компоненты скорости ветра, давление и плотность массы. Подробное описание методики ракетных наблюдений можно найти в [11].

На рис. 5 показан пример годового хода сглаженной величины зональной компоненты скорости ветра в 1988 году. Сглаживание проводилось отфильтровыванием среднечастотных и высокочастотных (в том смысле, в каком эти термины употребляются в данной статье) гармоник Фурьеразложения на годовом интервале посредством суммирования только первых трех гармоник на каждой высоте с шагом 1 км.

Приведенный высотно-временной разрез является типичным для обсуждаемого периода наблюдений. Нулевая изотаха — главный маркер се-





зонной перестройки — выделена толстой линией. Весной и осенью она вытянута в вертикальном направлении, однако любая сезонная перестройка не одномоментна, на разных высотах переход скорости через нуль происходит в разные моменты, поэтому в данной работе сезонные перестройки характеризуются интервалами времени, в течение которых переход скорости зонального ветра с одного направления на другое происходил на всех высотах.

Стрелки на рис. 4, направленные вниз, как раз и отмечают интервалы сезонных перестроек зональной циркуляции в 1988 году. Интересно отметить, что момент весенней смены внутри-сезонных режимов среднечастотных вариаций  $h'E_s$ приходится именно на интервал весенней перестройки циркуляции в средней атмосфере. Но осенью смена внутри-сезонных режимов среднечастотных вариаций  $h'E_s$  произошла на два месяца позже осенней перестройки в стратомезосфере.

На рис. 6 представлена сводка всех исследуемых событий, происходивших в 1984—1989 гг. в средней атмосфере и в области Е ионосферы. На рисунке сплошными (ломаными) линиями представлены границы интервалов времени сезонных перестроек зональной циркуляции в стратомезосфере над Волгоградом, ромбиками отмечены моменты смены режимов среднечастотной вариации  $h'E_s$  весной и осенью над Poitiers.

Сразу следует отметить, что замены зимне-весеннего режима среднечастотной вариации  $h'E_s$ .на летний режим в пяти случаях из шести произошли во время весенних перестроек зональной циркуляции. Только в 1989 году изменение в нижней термосфере опережает перестройку в средней атмосфере. Нетрудно подсчитать, что вероятность



**Рис. 5.** Высотно-временной разрез сглаженных вариаций зональной скорости ветра (м/с) в средней атмосфере над СРЗА Волгоград (48°68 с.ш., 44°35 в.д.) в 1988 году.

случайности пятикратного последовательного попадания событий весенней смены режимов среднечастотной вариации  $h'E_S$  в интервалы времени весенней перестройки циркуляции в стратомезосфере не превышает  $10^{-4}$ . Что позволяет уверенно говорить о связи этих двух событий в нижней термосфере и в средней атмосфере.

Смены летнего режима среднечастотной вариации  $h'E_s$  на осенне-зимний режим не совпадают с интервалами времени осенних перестроек циркуляции. Но обращает на себя внимание систематический характер их запаздывания относительно осенних перестроек в средней атмосфере. Вероятность всем шести «осенним» крестикам случайно оказаться на рис. 6 выше интервалов осенних перестроек циркуляции не превышает 8 × 10<sup>-3</sup>.

### 4. СВЯЗЬ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОДОВОЙ ВАРИАЦИИ *h'E<sub>s</sub>* С СЕЗОННЫМИ ПЕРЕСТРОЙКАМИ ЦИРКУЛЯЦИИ В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Впервые годовой ход  $h'E_s$  в средних широтах был исследован в [12] по данным ионосферных



**Рис. 6.** Регулярность и временная последовательность связанных событий в средней атмосфере и в нижней термосфере. Обозначения: непрерывные линии – границы временных интервалов сезонных перестроек циркуляции в стратомезосфере; крестики – дни максимумов в годовом ходе  $h'E_S$ ; кружки – дни минимумов в годовом ходе  $h'E_S$ ; ромбы – дни смены режимов внутри-сезонных вариаций  $h'E_S$ .

станций Budapest и Bekescsaba (Венгрия) 1958– 1959 и 1964–1965 гг. Были найдены зимний и весенний максимумы  $h'E_S$  и минимум осенью. Позже в [13] по данным ионосферной станции Juliusruh (Германия) 1969–1973 гг. было подтверждено существование максимума  $h'E_S$  в апреле или мае и минимума в октябре или ноябре. В этих работах не конкретизируется метод выделения годовой вариации  $h'E_S$  как полезного сигнала из зашумленных первичных данных наблюдений, но по некоторым признакам можно понять, что использовались значения, усредненные за каждый календарный месяц.

В настоящей работе суммировались первые пять гармоник ежегодных Фурье-разложений данных наблюдений. Эти гармоники, резко отличаясь по амплитуде от среднечастотных и высокочастотных гармоник (кроме суточной гармоники), позволили рассматривать их как гармоническое разложение суммы годовой вариации и, вообще говоря, тренда. Далее в статье сумма выбранных низкочастотных гармоник будет рассматриваться как годовая вариация.

На рис. 7 представлена годовая вариация  $h'E_S$ над станцией Poitiers в 1988 году. Подтверждены весенний максимум и осенний минимум, обнаруженные ранее в [12, 13]. Хотя амплитуды этих экстремумов могут меняться от года к году, привязка по времени в 1984—1989 гг. сохраняется: апрельмай для максимума и октябрь-ноябрь для минимума. А вот зимний максимум над станцией Poitiers весьма изменчив и по амплитуде, и по вре-



**Рис. 7.** Сглаженная годовая вариация *h*'*E*<sub>S</sub> (сумма первых 5 гармоник Фурье-разложения на годовом интервале) для станции Poitiers по данным 1988 года – сплошная линия. Прерывистая линия – ступенчатая функция из рис. 4. Стрелки – временные границы весенней и осенней перестроек циркуляции в стратомезосфере.

мени появления. В разные годы он обнаруживается в разные зимние месяцы с декабря по февраль. Возможно, по этой причине он плохо проявился в результатах [12, 13] — используемое усреднение по календарным месяцам могло сгладить его.

На рис. 7 для сопоставления приведены интервалы сезонных перестроек зональной скорости ветра в средней атмосфере над Волгоградом и моменты смены режимов внутри-сезонных вариаций  $h'E_S$  над Poitiers. И день весеннего максимума годовой вариации, и момент смены режимов внутри-сезонных вариаций  $h'E_S$  с зимне-весеннего на летний попадают в интервал времени весенней перестройки циркуляции в средней атмосфере. Осенью эти три явления разнесены по времени и следуют в следующем порядке: перестройка циркуляции, минимум годовой вариации  $h'E_S$ , смена режимов среднечастотной вариации  $h'E_S$ .

# 5. ОБСУЖДЕНИЕ

Сводка обсуждаемых в настоящей статье событий в области Е ионосфере над Poitiers и в средней атмосфере над Волгоградом в 1984—1989 гг. представлена на рис. 6 в их последовательности по времени.

Наиболее интересный вывод, какой можно сделать из анализа рис. 6, представляется следующим: несмотря на то, что расположение обсуждаемых явлений по времени относительно осенней перестройки циркуляции явно отличается от их расположения относительно весенней перестройки, в годовом ходе поддерживается строгий порядок, повторяющийся из года в год в течение пяти лет. И этот порядок явно указывает на связь явлений в нижней термосфере с сезонными перестройками, протекающими в средней атмосфере. Механизмы этой связи пока неясны. Тем более, пока нет ответа на вопрос: почему так быстро, почти одновременно, рассматриваемые события происходят весной, а осенью растягиваются более чем на два месяца? Почему каждую осень они следуют в одном и том же порядке? Почему осенью отставание момента смены режимов внутрисезонных вариаций от дня минимума годовой вариации  $h'E_s$  пять лет подряд имеет близкие значения — от 21 до 28 суток (при среднем значении 24 дня и средне-квадратичной погрешности этого значения 1, 2 суток)?

Возможно. подсказка к ответу на вопрос о различии поведения обсуждаемых характеристик слоя  $E_S$  осенью и весной лежит в характере годовой вариации  $h'E_S$  (рис. 7). Понижение средней высоты образования  $E_S$  при переходе от весны к осени более чем на десять километров может изменить динамические [1, 2], химические (связанные с переносом вниз ионов метеорного происхождения) и электродинамические (уменьшение плотности заряженных частиц и влияния ионосферного электрического поля) условия образования слоя и его взаимодействия с планетарными волнами. Эти вопросы требуют проведения дополнительных исследований.

## 6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Анализ данных наблюдений действующей высоты слоя Е-спорадического в 1984-1989 гг. над станцией Poitiers (46°6 с.ш.; 0°3 в.д.) обнаружил два режима вариаций  $h'E_s$  с периодами 2–30 суток: зимний, с более высокими амплитудами, и летний с меньшими амплитудами. Причем смена режимов происходит довольно быстро. Разработан метод объективного определения моментов перехода из одного режима в другой.

2. Сопоставление моментов смены режимов среднечастотной вариации  $h'E_S$  с интервалами дней реверса зональной скорости ветра во всей толще стратомезосферы показало, что весной (в 1984—1988 гг.) они совпадают, а осенью в 1984—1989 гг. смена режимов вариации  $h'E_S$  систематически запаздывает относительно реверса ветра в средней атмосфере на более чем два месяца.

3. Сопоставление дней весеннего максимума и осеннего минимума в годовом ходе  $h'E_S$  с интервалами дней перестройки циркуляции в стратомезосфере показало, что максимум годовой вариации  $h'E_S$  в 1984—1988 гг. приходится на интервал весенней перестройки, а минимум в годовом ходе  $h'E_S$  в 1984—1989 гг. систематически запаздывает по отношению к осенней перестройке стратомезосферной циркуляции.

4. Интересен обнаруженный факт синфазности межгодовых вариаций моментов минимума  $h'E_S$  в ее годовой вариации и моментов смены летнего режима внутри-сезонных вариаций  $h'E_S$  на зимний режим в 1984—1989 гг. Разность по времени между первыми и последними из года в год почти не меняется.

5. Неизменный из года в год порядок следования анализируемых событий внутри годовых циклов — веское свидетельство их связи при ведущей роли сезонных перестроек циркуляции в средней атмосфере.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Whitehead J.D. Formation of the Sporadic E Layer in the Temperate Zones // Nature. 1960. № 4750. P. 567.
- 2. *Whitehead J.D.* The formation of the sporadic E layer in temperate zones // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1961. V. 20. P. 49–58.
- 3. *Kokourov V.D., Vergasova G.V., Kazimirovsky E.S.* Oscillations with planetary wave periods in variations in the ionospheric parameters over Eastern Siberia // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. V. 49. № 7. P. 994–1001.
- Karami K., Ghader S., Bidokhti A.A., Joghataei M., Neyestani A., Mohammadabadi A. Planetary and tidal wave-type oscillations in the ionospheric sporadic E layers over Tehran region // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A04313. https://doi.org/10.1029/2011JA017466
- Pignalberi A., Pezzopane M., Zuccheretti E. A spectral study of the mid-latitude sporadic E layer characteristic oscillations comparable to those of the tidal and the planetary waves // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2015. V. 122. P. 34–44.
- Mošna Z., Knížová P. Koucká. Analysis of wave-like oscillations in parameters of sporadic E layer and neutral atmosphere // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2012. V. 90–91. P. 172–178.
- Mošna Zbyšek, Knížová Petra Koucká, Potužníková Kateřina. Coherent structures in the Es layer and neutral middle atmosphere // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2015. V. 136. 155–162.
- 8. *Charney J.G., Drazin P.G.* Propagation of planetaryscale disturbances from the lower into the upper atmosphere // Journal of Geophysical Research. 1961. V. 66. № 1. P. 83–109.
- URSI handbook of ionogram interpretation and reduction / Ed. Piggot W.R., Rawer K. Ashville, NC.: U.S. Department of Commerse, NOAA. 1972. VI+324 p.
- ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/ionosonde/request/Ionospheric\_Digital\_Database\_Data.zip.
- Метеорология верхней атмосферы Земли / Под ред. Г.А. Кокина и С.С. Гайгерова. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 270 с.
- 12. Bencze P. Seasonal variations of the virtual height of sporadic  $E(h'E_S)$  at middle latitudes and its possible origin // Pure and applied geophysics. 1969. V. 75. P. 167–174.
- Märcz F, Bencze P. Changes in sporadic E parameters observed at Juliusruh during a period following solar activity maximum, // Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica. 2004. V. 39. P. 341–354.

2022

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 58 № 4

# On the Relationship of the Characteristics of the Annual Cycle of the Virtual Height of the E-Sporadic Ionosphere Layer with Seasonal Rearrangements of Stratomesospheric Circulation

### A. A. Kuminov\*

The Central Aerological Observatory of Roshydromet, Pervomayskaya, 3, Dolgoprudny, 141700 Russia \*e-mail: airship@mail.mipt.ru

Analysis of the time course of the virtual heights of the E-sporadic layer ( $h'E_S$ ), determined by ionograms with increased accuracy (1 km), revealed the following features of annual variations in the middle latitudes of the northern hemisphere. It turned out that in winter the intra-seasonal average values of  $h'E_S$  are higher than in summer. The range of intra-seasonal variations, which, along with noise, contain fluctuations with periods from several days to several tens of days, is also greater in winter than in summer. It should be noted that seasonal mode changes occur quite quickly. This circumstance, as well as an increase in the amplitudes of variations with periods characteristic of planetary waves in winter, allow to make an assumption about the connection of seasonal transitions in the behavior of  $h'E_S$  with spring and autumn rearrangements of circulation in the middle atmosphere. In order to verify this assumption, the results of rocket measurements of the zonal wind speed at altitudes of 20–80 km above Volgograd (48°68 N., 44° 35 E) were compared with the data of the ionospheric station Poitiers (46° 6 N, 0° 3 E) in 1984–1989. It turned out that in 1984–1988 the timing of the spring change of seasonal modes of  $h'E_S$  behavior and the rearrangement of the stratomesospheric circulation from the west to the east coincided, and only in 1989 the transition in the ionosphere was somewhat ahead of the rearrangement in the middle atmosphere. In autumn, the change of seasonal modes of  $h'E_S$  behavior in 1984–1989 was always delayed relative to the beginning of the reversal of the zonal wind in the stratomesosphere by an almost fixed time interval of about two months.

**Keywords:** E-sporadic layer, circulation in the middle atmosphere, annual variations, rocket sounding, ion-ospheric radiosonding