
**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТРАТОСФЕРНОЙ АКТИВНОСТИ НА ИОНОСФЕРУ
ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА КОМПЛЕКСЕ ИНСТРУМЕНТОВ ИСЗФ СО РАН****ESTIMATED INFLUENCE OF STRATOSPHERIC ACTIVITY
ON THE IONOSPHERE ACCORDING TO MEASUREMENTS
WITH ISTP SB RAS TOOLS****М.В. Толстик***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, maxim@iszf.irk.ru***К.Г. Раговский***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ratovsky@iszf.irk.ru***И.В. Медведева***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ivmed@iszf.irk.ru
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Москва, Россия***Д.С. Хабитуев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, khabituev@iszf.irk.ru***M.V. Tolstikov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, maxim@iszf.irk.ru***K.G. Ratovsky***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ratovsky@iszf.irk.ru***I.V. Medvedeva***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ivmed@iszf.irk.ru
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS,
Moscow, Russia***D.S. Khabituev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, khabituev@iszf.irk.ru*

Аннотация. Представлены результаты комплексного исследования проявления волновой активности с периодами внутренних гравитационных волн (ВГВ) в различных областях атмосферы: стратосфере, верхней мезосфере и F2-области ионосферы. Для анализа использованы данные радиофизических и спектрометрических измерений на комплексе инструментов Института солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН и данные реанализа Era-Interim. Коэффициент сдвиговой корреляции между ионосферной и стратосферной активностью для годового интервала варьирует в диапазоне 0.45–0.54, а для 27-дневного интервала достигает 0.4–0.8 в 70 % случаев; 30 % коэффициентов, меньших 0.4, можно объяснить влиянием вариаций нейтрального ветра, геомагнитной активностью, нестратосферными источниками ВГВ. Сравнение стратосферной активности и вариаций характеристик перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) показало, что при сдвиге стратосферной активности на ~15 дней наблюдается достаточно высокая корреляция между стратосферной активностью и возмущенностью характеристик ВГВ (~0.6). Запаздывание между возмущенностью характеристик ВГВ и стратосферной активностью порядка 15 дней может объясняться соответствующим запаздыванием температурных вариаций на высотах нижней термосферы относительно температурных вариаций на высотном уровне давления 1 гПа. Сравнительный анализ вариаций мезосферной и ионосферной активности выявил временные интервалы, на которых их поведение носит согласованный характер.

Ключевые слова: стратосфера, мезосфера, ионосфера, планетарные волны, ПИВ, ВГВ.

Abstract. We present the results of a comprehensive study of the manifestation of wave activity with periods of internal gravity waves (IGW) in various regions of the atmosphere: in the stratosphere, upper mesosphere, and in the F2-region of the ionosphere. The study is based on radiophysical and spectrometric measurements made with tools of the Institute of Solar-Terrestrial Physics (ISTP) SB RAS and the Era-Interim reanalysis data. The correlation coefficient with time shift between ionospheric and stratospheric activity for the annual interval varies in the range from 0.45 to 0.54, and for the 27-day interval it reaches the levels 0.4–0.8 in seventy percent of the cases. Thirty percent of correlation coefficients less than 0.4 can be explained by the influence of neutral wind, geomagnetic activity, and non-stratospheric IGW sources. Comparison between stratospheric activity and variations in characteristics of traveling ionospheric disturbances (TID) has shown that a ~15 day shift in stratospheric activity results in a fairly high correlation between stratospheric activity and disturbance of IGW characteristics (~0.6). The delay of about 15 days can be attributed to the delay in the temperature variations at heights of the lower thermosphere relative to the temperature variations at the altitude pressure level of 1 hPa. Comparative analysis of variations in mesospheric and ionospheric activity has revealed time intervals when their behavior is consistent.

Keywords: stratosphere, mesosphere, ionosphere, planetary waves, TID, IGW.

ВВЕДЕНИЕ

Состояние атмосферы Земли во многом определяется комплексным влиянием динамических, химических, радиационных, термических, электродинамических процессов, а также воздействием солнечной и геомагнитной активности. Волновые процессы являются основным механизмом переноса энергии между различными областями атмосферы. Атмосферные волны могут распространяться на значительные расстояния и переносить энергию из нижележащих слоев в верхнюю атмосферу, обеспечивая процесс взаимосвязи атмосферных слоев. К настоящему времени получены экспериментальные доказательства влияния сильных метеорологических возмущений, например внезапных стратосферных потеплений (ВСП), на параметры атмосферы на уровнях мезосферы и даже термосферы [Goncharenko, Zhang, 2008, Goncharenko et al., 2010, 2013; Pancheva, Mukhtarov, 2011; Korenkov et al., 2012; Polyakova et al., 2014; Medvedev et al., 2015, Tolstikov et al., 2019]. Однако в настоящий момент не существует общепринятой теории передачи энергии от наблюдаемого метеорологического явления до высот термосферы. В данной работе мы провели поиск откликов ионосферы над Иркутском на возмущения в стратосфере и мезосфере. Анализ волновой активности на стратосферных высотах проводился по данным реанализа Era-Interim о вертикальной скорости ветра на уровне давления 1 гПа (~50) км. Для анализа проявления волновой активности в верхней мезосфере были использованы данные о вращательной температуре молекулы гидроксила (полоса ОН(6-2) 834.0 нм, высота высвечивания ~87 км), получаемой по спектрометрическим измерениям в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (51.8° N, 103.1° E, Торы). Для анализа проявления волновой активности на ионосферных высотах были использованы значения максимума электронной концентрации N_mF2 по данным Иркутского (52.3° N, 104.3° E) ионозонда вертикального зондирования (ионосферная активность) и характеристики перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), полученные на основе одновременных измерений на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР) и Иркутском ионозонде (возмущенность характеристик ВГВ). В исследовании использованы также спутниковые данные измерений вертикальных профилей температуры атмосферы MLS Aura [<http://disc.gsfc.nasa.gov/Aura>] и данные K_p -индекса геомагнитной активности Мирового центра данных (WDC Boulder, Colorado, [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP]).

СРАВНЕНИЕ СТРАТОСФЕРНОЙ И ИОНОСФЕРНОЙ АКТИВНОСТИ

В большинстве работ при исследовании волновой активности стратосферы используется пространственно-временной спектральный анализ [Hayashi, 1971]. Для атмосферных параметров (в основном геопотенциальной высоты, потенциальной темпера-

туры, зональной скорости) рассчитывается фурье-спектр с выделением волн с различными волновыми числами [Pogoreltsev et al., 2015; Dell'Aquila et al., 2005]. В работе [Shpynev et al., 2015] проводились похожие исследования волновой активности стратосферы с помощью спектров вертикальной скорости. Такой подход расчета спектра по всему широтному кругу оправдан для установления глобальных зависимостей и трендов в атмосфере, но плохо подходит для выявления изменчивости атмосферы в небольшой локальной области. В связи с этим, чтобы оценить стратосферную волновую активность в Иркутском регионе, мы применили следующую методику. Из всего массива данных реанализа выделялся сектор с географическими координатами 50°–60° N и 90°–120° E (Иркутский регион). В качестве меры стратосферной активности использовалась мера пространственной неоднородности данных, задаваемая среднеквадратичным отклонением вертикальной скорости на высотном уровне давления 1 гПа относительно среднего значения скорости для рассматриваемого сектора. Единица измерения стратосферной активности — миллипаскаль в секунду (мПа/с), временное разрешение — 1 сут. В качестве меры ионосферной активности использовалось среднеквадратичное значение относительных возмущений N_mF2 в диапазоне периодов ВГВ, полученное усреднением за одни сутки. Относительные возмущения N_mF2 в диапазоне периодов ВГВ представляли собой относительные отклонения N_mF2 от скользящих 27-дневных медиан. Эти возмущения с помощью фильтра низких частот (граничный период 6 ч) разделялись на низкочастотную (периоды более 6 ч) и высокочастотную (менее 6 ч) составляющие. Высокочастотная составляющая использовалась в качестве возмущений в диапазоне ВГВ. Единицей измерения ионосферной активности являются проценты (%), а временное разрешение составляет 1 сут.

Считается, что основным механизмом переноса энергии между различными слоями атмосферы являются волновые процессы. Поэтому при сравнении стратосферной и ионосферной активности необходимо учитывать сложность данной задачи.

Во-первых, на распространение волны от высот стратосферы до высот термосферы требуется некоторое время, поэтому можно ожидать задержку между вариациями стратосферной и ионосферной активности. Она может быть различной для разных временных интервалов из-за интерференции нескольких возмущений и изменения характеристик волн.

Во-вторых, нейтральный ветер оказывает существенное влияние на условия распространения внутренних гравитационных волн (ВГВ). При распространении ВГВ по ветру на некоторых высотах могут возникать критические слои, в которых ВГВ поглощается. Таким образом, критические слои могут блокировать распространение ВГВ на ионосферные высоты. При распространении ВГВ против ветра могут существовать слои горизонтального и вертикального отражений, эти слои также препятствуют прохождению ВГВ на ионосферные высоты. При

возникновении слоев вертикального отражения и отсутствии критического слоя между ними может реализоваться волноводное распространение ВГВ, при котором волна заперта между двумя слоями по вертикали и волновое возмущение будет уходить далеко от источника генерации ВГВ в горизонтальной плоскости. Горизонтальное смещение пакета ВГВ может достигать тысяч километров [Ерохин и др., 2007а, б; Суслов и др., 2017]. Таким образом, вариации нейтрального ветра могут привести к снижению корреляции между стратосферной и ионосферной активностью.

В третьих, геомагнитная активность, нестратосферные источники ВГВ, ионосферные вариации, не связанные с ВГВ, но в диапазоне периодов ВГВ, также приведут к снижению корреляции между стратосферной и ионосферной активностью.

Для сопоставления годовых вариаций ионосферной и стратосферной активности за 2011–2016 гг. были рассчитаны корреляционные функции между ними для каждого года, и найдены временные сдвиги (в диапазоне 0–35 дней), обеспечивающие максимумы соответствующих корреляционных функций [Бат, 1980]. Максимум корреляционной функции $K(\tau)$ мы называем далее коэффициентом сдвиговой корреляции:

$$K(\tau) = \frac{\sum((S(t-\tau) - \bar{S})(I(t) - \bar{I}))}{\sigma_S \sigma_I}, \quad (1)$$

где S — стратосферная активность; I — ионосферная активность; $\sigma(S)$ — среднеквадратичное отклонение стратосферной активности; $\sigma(I)$ — среднеквадратичное отклонение ионосферной активности.

В табл. 1 показаны годовые коэффициенты корреляции между стратосферной и ионосферной активностью для 2011–2016 гг.

Видно, что во все рассмотренные годы имеется средний коэффициент корреляции ~0.5 между вариациями стратосферной и ионосферной активностью. Для объяснения задержки между ними выдвинута следующая гипотеза. Если бы стратосферная и ионосферная активность была обусловлена одним и тем же потоком ВГВ, задержка составляла бы несколько часов, но не суток. Альтернативной версией является то, что мы наблюдаем различные потоки ВГВ, имеющие одну и ту же причину — активность планетарных волн. Предполагается, что наибольшая активность ВГВ имеет место на фазе максимума планетар-

ной волны, при этом на ионосферную активность наиболее сильное влияние оказывают возмущения в области мезопаузы (~90 км) [Medvedev et al., 2017; Tolstikov et al., 2019]. В таком случае задержка между вариациями стратосферной и ионосферной активности объясняется запаздыванием максимума планетарной волны в области мезопаузы (~90 км) относительно максимума планетарной волны в области стратопаузы (~50 км). С учетом того, что характерные вертикальные длины планетарных волн ~20–150 км и характерные периоды планетарных волн ~5–45 дней [Tolstikov et al., 2014], задержка в несколько дней выглядит реалистичной. Задержка между стратосферной и ионосферной активностью в разные годы может различаться из-за изменения характеристик планетарных волн.

Как упоминалось выше, на ионосферную активность помимо стратосферной активности влияет много факторов, в том числе важнейшую роль играет магнитная активность. На рис. 1 представлена регрессия коэффициентов корреляции на геомагнитную активность (K_p -индекс). Как и ожидалось, в более магнитоспокойные годы корреляция между стратосферной и ионосферной активностью выше.

Как стратосферная, так и ионосферная активность имеет ярко выраженный сезонный ход: зимой в среднем активность больше, чем летом. Однако, кроме сезонного хода, в стратосферной и ионосферной активности присутствует множество более мелкопериодных вариаций. Для их исследования необходимо перейти к анализу корреляции между стратосферной и ионосферной активностью на меньших временных интервалах. Рассчитаем без сдвига коэффициент корреляции для каждого 27-дневного интервала, выбор которого основан на следующих соображениях. С одной стороны, интервал должен включать в себя число данных, необходимое для корреляционного анализа. С другой стороны, интервал должен соответствовать приблизительно одинаковым сезонным условиям. Таким образом, 27-дневный интервал является компромиссом между указанными требованиями.

На рис. 2 показан коэффициент корреляции без сдвига как функция года (вертикальная ось) и дня года (горизонтальная ось). День года означает, что коэффициент корреляции рассчитывался на интервале ± 13 дней относительно данного дня года. Видно, что коэффициент корреляции испытывает квазипериодические вариации от -0.6 до 0.6, что можно объяснить следующим образом. Как упоминалось ранее,

Таблица 1

Годовые коэффициенты корреляции между стратосферной и ионосферной активностью

Год	Коэффициент корреляции без сдвига	Коэффициент корреляции со сдвигом	Оптимальный сдвиг в днях
2011	0.42	0.51	10
2012	0.4	0.45	6
2013	0.53	0.54	1
2014	0.38	0.52	6
2015	0.48	0.49	2
2016	0.48	0.49	15

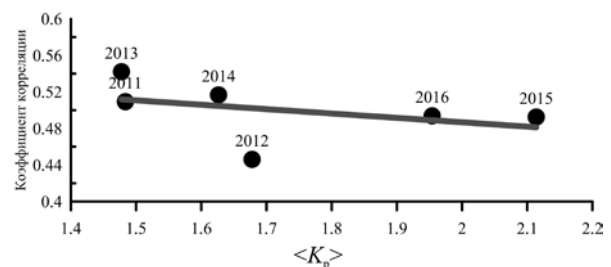


Рис. 1. Регрессия коэффициентов корреляции между стратосферной и ионосферной активностью (с оптимальным сдвигом) на геомагнитную активность

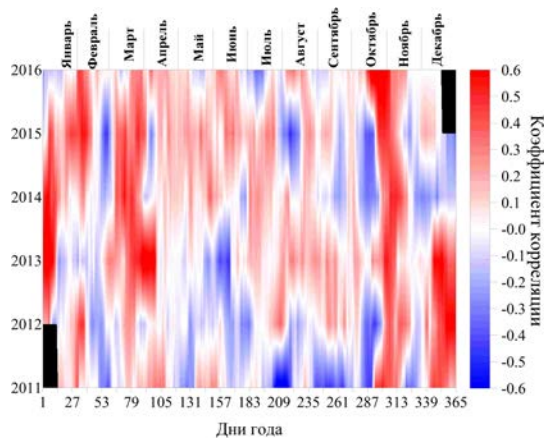


Рис. 2. Коэффициенты корреляции между стратосферной и ионосферной активностью как функция года (вертикальная ось) и дня года (горизонтальная ось) для 27-дневных интервалов

задержка между вариациями стратосферной и ионосферной активности может объясняться запаздыванием максимума планетарной волны в области мезопаузы (~90 км) относительно максимума в области стратосферной (~50 км). Если бы стратосферная активность обеспечивалась одной планетарной волной, мы наблюдали бы постоянный коэффициент корреляции. Его уменьшение в каждой точке зависело бы от разности фаз волны на 50 и 90 км. Изменение разности фаз в течение года не приводило бы к квазипериодическим вариациям. Их причиной может быть интерференция нескольких планетарных волн. В работе [Tolstikov et al., 2014] показано, что температурные возмущения во время стратосферных потеплений 2004–2013 гг. являлись интерференцией как минимум двух планетарных волн. Интерференция приводит к квазипериодическим изменениям разности фаз суммарной волны на 50 и 90 км, что, в свою очередь, дает квазипериодические изменения коэффициента корреляции.

На рис. 3 показаны коэффициент сдвиговой корреляции и оптимальный сдвиг в днях как функции года (вертикальная ось) и дня года (горизонтальная ось). Видно, что в среднем коэффициенты сдвиговой корреляции существенно больше коэффициентов без сдвиговой корреляции. Средний коэффициент сдвиговой корреляции ~0.47, 70 % коэффициентов сдвиговой корреляции между стратосферной и ионосферной активностью больше 0.4 и 16 % больше 0.6. Данные факты свидетельствуют о влиянии планетарных волн в стратосфере на ионосферу; 30 % коэффициентов сдвиговой корреляции, меньшие 0.4, можно объяснить влиянием вариаций нейтрального ветра, геомагнитной активностью, нестратосферными источниками ВГВ. Квазипериодические вариации оптимального сдвига могут быть обусловлены биениями в результате интерференции нескольких волн.

СРАВНЕНИЕ СТРАТОСФЕРНОЙ АКТИВНОСТИ И ВАРИАЦИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ПИВ

Автоматические методы обработки данных одновременных измерений на ИРНР и Иркутском ионозонде DPS-4 позволили получить представительную

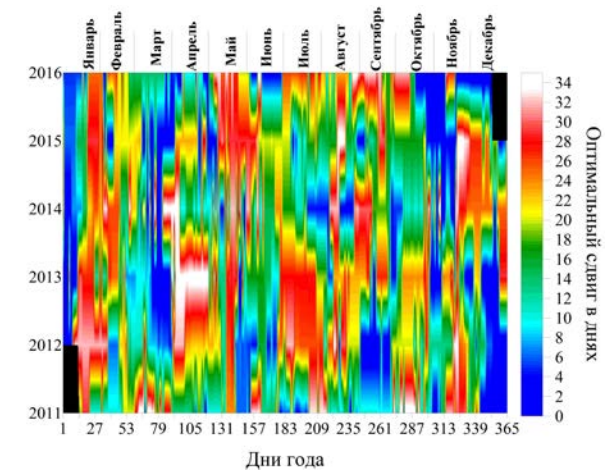
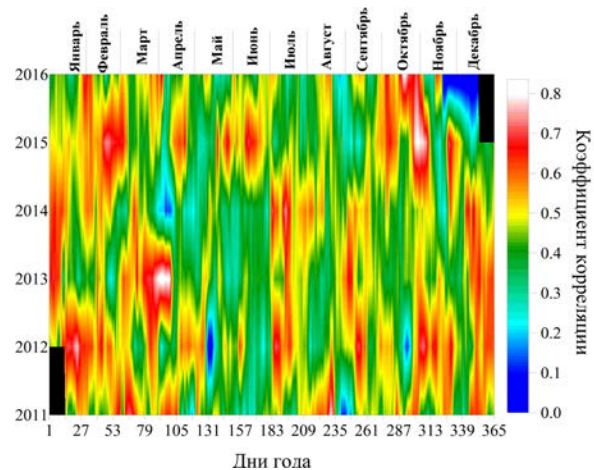


Рис. 3. Коэффициент сдвиговой корреляции и оптимальный сдвиг в днях как функции года (вертикальная ось) и дня года (горизонтальная ось) для 27-дневных интервалов

статистику параметров распространения ПИВ в ионосфере [Medvedev et al., 2015]. В данной работе мы использовали методы численной оценки возмущенных распределений параметров ПИВ, разработанные в [Tolstikov et al., 2019]. Используя весь объем зимних данных одновременных измерений на ИРНР и Иркутском ионозонде DPS-4 были рассчитаны среднезимние распределения параметров ПИВ.

Результаты расчетов показаны на рис. 4. После этого были определены коэффициенты корреляции K между среднезимним распределением каждого параметра и распределением в конкретный день. Степенью возмущенности каждого дня по параметру (азимут, наклонение, длина волны и модуль скорости) полагалась разность $1-K$. При $K=1$ распределение параметра полностью совпадает со среднезимним распределением и возмущенность равна нулю. При $K=0$ возмущенность равна единице, при $K=-1$ она равна двум. Теперь можно сравнить возмущенность каждого параметра ВГВ со стратосферной активностью. Наиболее длинный ряд наблюдений соответствует 2011 г. (16 января – 16 февраля).

На рис. 5 показано сравнение стратосферной активности и возмущенности характеристик ВГВ для зимнего периода 2011 г. (16 января – 16 февраля), соответствующего наиболее длинному ряду наблюдений. Из рис. 5 и табл. 2 видно, что при сдвиге страто-

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между стратосферной активностью и возмущенностью характеристик ПИВ

	Коэффициент корреляции без сдвига	Коэффициент корреляции со сдвигом	Оптимальный сдвиг в днях
Азимут	-0.5	0.64	15
Наклонение	-0.03	0.56	12
Длина волны	-0.3	0.66	15
Скорость	0	0.6	9

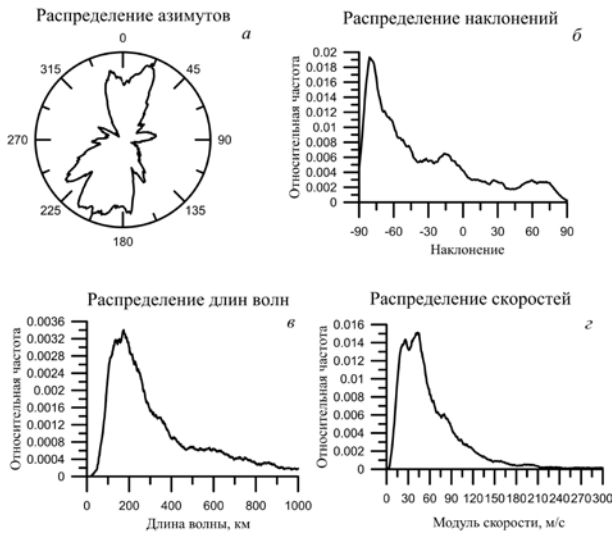


Рис. 4. Среднезимние распределения параметров ПИВ: а — азимутов ПИВ; б — наклонений (угол к горизонту: положительный вверх, отрицательный вниз) ПИВ; в — длин волн; г — скоростей

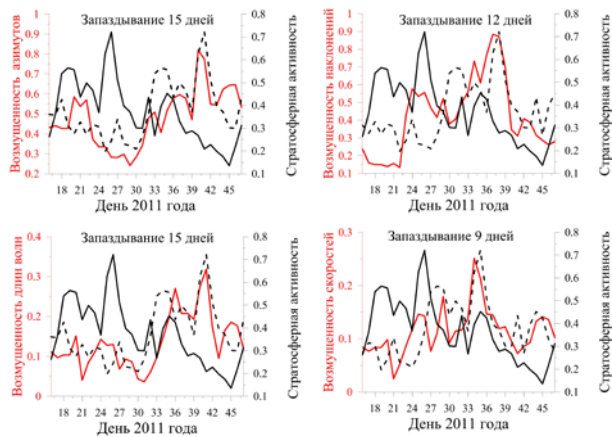


Рис. 5. Сравнение стратосферной активности и возмущенности характеристик ПИВ для 2011 г. Черная линия — стратосферная активность, красная — возмущенность параметра ПИВ, черная штриховая — стратосферная активность, сдвинутая для достижения максимального коэффициента корреляции

сферной активности на ~15 дней наблюдается достаточно высокая корреляция между стратосферной активностью и возмущенностью характеристик ВГВ. Возрастание или уменьшение стратосферной активности и возмущенности характеристик ВГВ могут являться следствием общей причины — воздействия мощной планетарной волны. В первом случае планетарная волна действует на высотном уровне давления 1 гПа, тогда как изменение возмущенности характе-

ристик ВГВ связано с изменением ветровой картины на высотах нижней термосферы. [Medvedev et al., 2017; Tolstikov et al., 2019]. Запаздывание возмущенности характеристик ВГВ ~15 дней можно объяснить соответствующим запаздыванием температурных вариаций на высотах нижней термосферы относительно температурных вариаций на высотном уровне давления в 1 гПа. Для оценки реалистичности полученной задержки были использованы данные о температуре, полученные спутником AURA.

На рис. 6 представлены дневные температуры над Иркутском на высотах ~50 и ~90 км для периода 16 января – 16 февраля 2011 г. Без временного сдвига коэффициент корреляции между температурами на высотах ~50 и ~90 км составлял ~0.21, а при сдвиге на 19 дней — ~0.41. Задержка, полученная по данным спутника AURA (19 дней), сравнима с задержкой, которую дает сопоставление стратосферной активности и возмущенности характеристик ВГВ (15 дней).

СРАВНЕНИЕ МЕЗОСФЕРНОЙ И ИОНОСФЕРНОЙ АКТИВНОСТИ

Для анализа проявления волновой активности в верхней мезосфере были использованы данные о вращательной температуре молекулы гидроксила (полоса OH(6-2) 834.0 нм, ~87 км), получаемой из спектрометрических измерений в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (51.8° N, 103.1° E, Торы) с временным разрешением 10 мин. Вращательная температура молекулы гидроксила отображает температуру атмосферы на высотах мезопаузы. В качестве характеристики атмосферной изменчивости в верхней мезосфере использованы стандартные отклонения температуры мезопаузы (K) в ночном ходе, с помощью

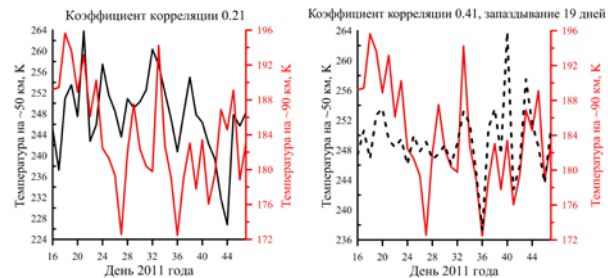


Рис. 6. Дневные температуры над Иркутском на высотах ~50 и ~90 км, полученные спутником AURA. Черная линия — температура на ~50 км, красная линия — температура на ~90 км, черная пунктирная — температура на ~50 км с временным сдвигом для получения максимального коэффициента корреляции

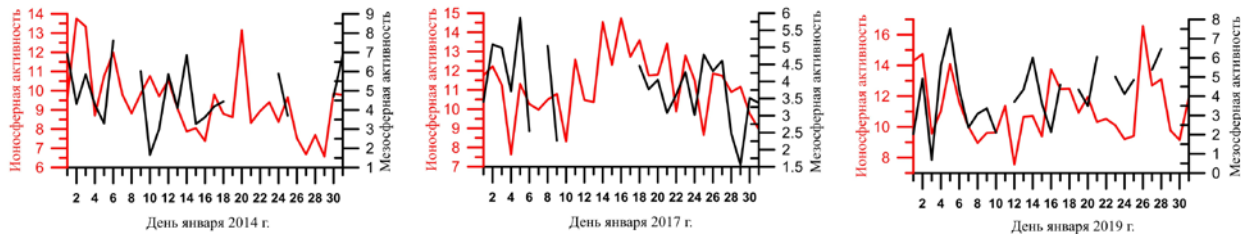


Рис. 7. Вариации ото дня ко дню ионосферной (красная линия, левая ось в %) и мезосферной (черная линия, правая ось, К) активности

которых можно анализировать проявление активности волн с периодами ВГВ на этих высотах. Подробно методика изложена в работах [Перминов и др., 2014; Perminov et al., 2014]. Измерения проводятся в ночное время суток в отсутствие сильной облачности и полной луны. Поскольку ряды данных спектрометрических наблюдений носят разрывный характер, что ограничивает возможности корреляционного анализа, в настоящей работе было проведено качественное сравнение проявления мезосферной и ионосферной активности, который выявил временные интервалы, на которых их поведение носит согласованный характер.

На рис. 7 в качестве примера приведены межсуточные вариации мезосферной и ионосферной активностей для январей 2014, 2017 и 2019 г.

ВЫВОДЫ

Комплексное исследование проявления волновой активности с периодами ВГВ в различных областях атмосферы позволило оценить влияние волновой активности в стратосфере и планетарных волн на волновую активность на ионосферных высотах.

Коэффициент сдвиговой корреляции между ионосферной и стратосферной активностью для годового интервала варьирует в диапазоне 0.45–0.54, а для 27-дневного интервала достигает 0.4–0.8 в 70 % случаев; 30 % коэффициентов сдвиговой корреляции, меньшие 0.4, можно объяснить влиянием вариаций нейтрального ветра, геомагнитной активностью, нестратосферными источниками ВГВ. Оптимальный временной сдвиг варьирует в широком диапазоне от 1 до 30 дней. Запаздывание ионосферной активности относительно стратосферной активности можно объяснить тем, что стратосферная активность определяется максимумом планетарной волны для стратопазузы (~50 км), тогда как на ионосферную активность наиболее сильное влияние оказывают возмущения на высотах мезопазузы (~90 км). В этом случае временной сдвиг определяется запаздыванием фазы планетарной волны в районе мезопазузы относительно фазы планетарной волны в стратосфере.

Сравнение стратосферной активности и вариаций характеристик перемещающихся ионосферных возмущений показало, что при сдвиге стратосферной активности на ~15 дней достигается достаточно высокая корреляция между стратосферной активностью и возмущенностью характеристик ВГВ (~0.6). Запаздывание порядка 15 дней возмущенности характеристик ВГВ может объясняться соответствующим

запаздыванием температурных вариаций на высотах нижней термосферы относительно температурных вариаций на высотном уровне давления в 1 гПа. Данная версия подтверждается близкой задержкой между температурными вариациями на высотах ~50 и ~90 км, полученным по данным спутника AURA.

Сравнительный анализ вариаций мезосферной и ионосферной активности выявил временные интервалы, на которых их поведение носит согласованный характер.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00212 и Минобрнауки России в части проведения наблюдений и обработки данных. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>] и Уникальной научной установки «Иркутский радар некогерентного рассеяния» [<http://ckp-rf.ru/usu/77733>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бат М. *Спектральный анализ в геофизике*. М.: Недра, 1980. 535 с.
- Ерохин Н.С., Михайловская Л.А., Шалимов С.Л. Прохождение крупномасштабных внутренних гравитационных волн через ветровые структуры в нижней и средней атмосфере на ионосферные высоты. *Геофизические исследования*. 2007а. Вып. 7. С. 53–64.
- Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А. Особенности взаимодействия внутренних гравитационных волн с температурно-ветровыми структурами атмосферы при распространении в ионосферу. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2007б. В 4 т. Т. 2. С. 84–89.
- Перминов В.И., Семенов А.И., Медведева И.В., Перцев Н.Н. Изменчивость температуры в области мезопазузы по наблюдениям гидроксильного излучения на средних широтах. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. Т. 54. № 2. С. 246–256.
- Суслов А.И., Ерохин Н.С., Михайловская Л.А. и др. Моделирование прохождения крупномасштабных ВГВ из тропосферы в ионосферу. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14, № 5. С. 19–25. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-5-19-25](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-19-25).
- Dell'Aquila A., Lucarini V., Ruti P.M., Calmanti S. Hayashi spectra of the northern hemisphere mid-latitude atmospheric variability in the NCEP-NCAR and ECMWF reanalyses. *Climate Dynamics*. 2005. Vol. 25, no. 6. P. 639–652.
- Goncharenko L., Zhang S.-R. Ionospheric signatures of sudden stratospheric warming: Ion temperature at middle latitude. *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. L21103. DOI: [10.1029/2008GL035684](https://doi.org/10.1029/2008GL035684).
- Goncharenko L.P., Chau J.L., Liu H.L., Coster A.J. Unexpected connections between the stratosphere and ionosphere.

Geophys. Res. Lett. 2010. Vol. 37. L10101. DOI: [10.1029/2010GL043125](https://doi.org/10.1029/2010GL043125).

Goncharenko L.P., Chau J.L., Condor P., et al. Ionospheric effects of sudden stratospheric warming during moderate-to-high solar activity: Case study of January 2013. *Geophys. Res. Lett.* 2013. Vol. 40. DOI: [10.1002/grl.50980](https://doi.org/10.1002/grl.50980).

Hayashi Y. A generalized method of resolving disturbances into progressive and retrogressive waves by space Fourier and time cross-spectral analyses. *J. Meteorol. Soc. Japan*. 1971. Vol. 49, no. 2. P. 125–128.

Korenkov Y.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V., et al. The global thermospheric and ionospheric response to the 2008 minor sudden stratospheric warming event. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. A10309. DOI: [10.1029/2012JA018018](https://doi.org/10.1029/2012JA018018).

Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., et al. A statistical study of internal gravity wave characteristics using the combined Irkutsk Incoherent Scatter Radar and Digisonde data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015. Vol. 132. P. 13–21. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.06.012](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.06.012).

Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., et al. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.* 2017. Vol. 122, iss. 7. P. 7567–7580. DOI: [10.1002/2017JA024103](https://doi.org/10.1002/2017JA024103).

Pancheva D., Mukhtarov P. Stratospheric warmings: The atmosphere-ionosphere coupling paradigm. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. Vol. 73, iss. 13. P. 1697–1702. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.03.006).

Perminov V.I., Semenov A.I., Medvedeva I.V., Zheleznov Yu.A. Variability of mesopause temperature from the hydroxyl airglow observations over midlatitudinal sites, Zvenigorod and Tory, Russia. *Adv. Space Res.* 2014. Vol. 54. P. 2511–2517. DOI: [10.1016/j.asr.2014.01.027](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.01.027).

Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N., Aniskina O.G., et al. Interannual and intraseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere-troposphere coupling during northern winter. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015. Vol. 136B. P. 187–200.

Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P. Ionospheric effects of sudden stratospheric warmings in Eastern Siberia region. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. Vol. 120. P. 15–23. DOI: [10.1016/j.jastp.2014.08.011](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.08.011).

Shpynev B.G., Churilov S.M., Chernigovskaya M.A. Generation of waves by jet stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015. Vol. 136. P. 201–215. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.005).

Tolstikov M.V., Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Medvedeva I.V. Studies of dynamic characteristics of atmospheric planetary waves during stratospheric warmings 2006–2013. *Proc. XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*. Beijing, 2014. P. 1–4. DOI: [10.1109/URSIGASS.2014.6929752](https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929752).

Tolstikov M.V., Oinats A.V., Medvedeva I.V., et al. Relation of traveling ionospheric disturbances characteristics with planetary waves in the middle atmosphere. *Photonics & Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS-Spring)*. Rome, Italy, 2019. P. 2176–2182. DOI: [10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017884](https://doi.org/10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017884).

URL: <http://disc.gsfc.nasa.gov/Aura> (дата обращения 20 октября 2021 г.).

URL: ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP (дата обращения 20 октября 2021 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 20 октября 2021 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/usu/77733> (дата обращения 20 октября 2021 г.).

Как цитировать эту статью:

Толстиков М.В., Ратовский К.Г., Медведева И.В., Хабитуев Д.С. Оценка влияния стратосферной активности на ионосферу по данным измерений на комплексе инструментов ИСЗФ СО РАН. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 84–90. DOI: [10.12737/szf-74202108](https://doi.org/10.12737/szf-74202108).