

ВЗАИМОСВЯЗЬ ДИНАМИКИ ВНЕТРОПИЧЕСКОЙ ТРОПОПАУЗЫ И РЕЗКИХ МЕЖДУСУТОЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В ПЕРИОД 2009–2011 гг.

А.Р. Иванова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
ivanova@mecom.ru*

Содержание озона является одним из основных отличий между тропосферой и стратосферой: последней принадлежит примерно 90 % всего озона. Тропопаузу, разделяющую эти два атмосферных слоя, часто отождествляют с озонопаузой, а ее положение определяют на основании некоторых критических значений отношения смеси озона и вертикального градиента этой характеристики [6].

Взаимосвязь тропопаузы и общего содержания озона (ОСО) является предметом многочисленных исследований [2, 6–7, 9–12]. Установлено, что в среднем при увеличении высоты тропопаузы содержание озона в атмосферном столбе уменьшается. Корреляция между этими величинами составляет примерно 0,6 для умеренных широт [11]. Несмотря на обилие информации об ОСО, получаемой сегодня по результатам спутниковых измерений, сопоставление ее с глобальными данными о тропопаузе затруднено. Это связано с тем, что последние могут быть получены для стандартных сроков анализа (0, 6, 12 и 18 ч ВСВ), а технология измерения ОСО со спутника привязана к моменту времени, близкому к местному полудню. В работе [2] впервые была проведена синхронизация данных о высоте тропопаузы и ОСО и изучена динамика тропопаузы для случаев значительных междусуточных изменений озона – более чем на 100 единиц Добсона (е.Д.). Было доказано, что резкое изменение ОСО в течение суток наблюдается на фоне немоного увеличения (уменьшения) высоты тропопаузы при сохранении общей тенденции к ее понижению (повышению). Причиной этого является чаще всего адвекция тропических воздушных масс с высокой тропопаузой и низким содержанием озона в северные широты или, напротив, глубокое проникновение холодных масс с низкой тропопаузой и богатых озоном к югу. Иногда резкие междусуточные изменения озона происходят в результате эволюции тропопаузы, в ходе которой она опускается на тропосферные уровни, а ОСО в столбе атмосферы увеличивается. Следствием обратного процесса – образования «куполов» тропопаузы при ее повышении – может быть уменьшение ОСО. Этот вывод был сделан в [2] для относительно небольшой выборки, содержащей данные только за 2009 год. В настоящей

работе подобное исследование связи междусуточной изменчивости высоты тропопаузы и ОСО дополнено информацией за 2010 и 2011 гг., а также произведен сравнительный анализ результатов для трех лет (включая 2009 г.).

Для получения информации об ОСО использовались данные измерения прибора OMI спутника AURA с FTP-сервера открытого доступа, принадлежащего Национальному управлению по воздухоплаванию и исследованию космического пространства США (NASA) <ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/data/ozone>. Результаты измерений для каждой даты представлены здесь в виде значений ОСО, осредненных для квадратов географической сетки со стороной 1°. Для анализа случаев в данной работе также использовались другие независимые данные об озоне – карты смоделированных полей ОСО из архива WOUDC (The World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre) и ежеквартальные обзоры содержания озона над территорией Российской Федерации.

Для того чтобы составить синхронную выборку измерений ОСО и значений высоты тропопаузы, были привлечены данные объективного анализа NCEP с одноградусным разрешением по широте и долготе. Поля высоты тропопаузы были рассчитаны для каждого из четырех сроков анализа NCEP по всему северному полушарию с использованием выражения для вертикальной составляющей потенциального вихря Эртеля, ПВЭ:

$$PV = -g \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \right) \frac{\partial \theta}{\partial p}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; f – параметр Кориолиса; u , v – зональная и меридиональная составляющие скорости ветра; θ – потенциальная температура; p – давление. Единицей ПВЭ служит величина $1 \text{ рву} = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1} \text{ К кг}^{-1}$. Такой подход к определению тропопаузы производится в рамках так называемой «динамической» концепции. Благодаря тому, что ПВЭ является инвариантом полной системы уравнений в крупномасштабном движении при отсутствии неадиабатических эффектов, он обеспечивает представление тропопаузы как квазиматериальной поверхности, однозначно определяемой в каждой расчетной точке. Высота тропопаузы рассчитывалась для каждого узла сетки путем поиска некоторой заданной величины на профиле ПВЭ, аппроксимированном сплайном по рассчитанным значениям на стандартных изобарических поверхностях. Для основных расчетов была выбрана изэртелическая поверхность 3,5 рву, высоты которой определялись для сроков 0, 6, 12 и 18 ч ВСВ. Затем для каждого поля выбирались данные о высоте тропопаузы для меридианов 180°, 90° в.д., 0°, 90° з.д. (с одноградусным допуском к западу и к востоку), на которых вышеуказанные стандартные сроки соответствуют времени местного полудня – моменту измерения ОСО. Подробное описание методики изложено в работе [2].

Кроме того, в каждом узле сетки, согласно [1], был рассчитан угол наклона тропопаузы как показатель степени ее деформации по формуле

$$SL = \varphi = \arccos \frac{\Delta x \Delta y}{\sqrt{(\Delta y \frac{\Delta H_{tr}}{\Delta x})^2 + (\Delta x \frac{\Delta H_{tr}}{\Delta y})^2 + (\Delta x \Delta y)^2}}, \quad (2)$$

где Δx и Δy – шаги по широте и по долготе; $\frac{\Delta H_{tr}}{\Delta x}$ и $\frac{\Delta H_{tr}}{\Delta y}$ – изменение высоты тропопаузы вдоль широты и долготы соответственно.

Междусуточная изменчивость общего содержания озона (ΔOCO) рассчитывалась для каждого квадрата сетки размером $1 \times 1^\circ$ в широтной полосе $30-70^\circ$ северного полушария путем сравнения результатов измерений для двух последовательных сроков. Выборка ΔOCO для каждого года составила $41 \times 3 \times 360 \times 364 = 16117920$ значений. Анализ показал, что спектр повторяемостей ΔOCO слабо меняется от года к году. Примерно в 70 % случаев в течение суток изменение OCO не превышает 20 е.Д., в 90 % – 40 е.Д. Изменение OCO в течение суток более чем на 100 е.Д. наблюдалось в 2009, 2010 и 2011 гг. соответственно в 0,25, 0,26 и 0,27 % случаев.

Далее рассмотрим только те случаи, которые отмечены значительной междусуточной изменчивостью озона (более чем на 100 е.Д.). Напомним, что в умеренных широтах значения OCO чаще всего наблюдаются в диапазоне 300–500 е.Д., поэтому изменения на 100 е.Д. за сутки являются существенными. По сравнению со средним по широте значением OCO , в большинстве случаев ситуации с $|\Delta OCO| > 100$ е.Д. соответствовали отклонению на 20–30 %. Отклонения OCO от средних значений по широте более чем на 50 % были зафиксированы всего 1 раз в 2010 г., трижды в 2011 г. и 28 раз в 2009 году.

Предыдущее исследование [2], относящееся к 2009 г., зафиксировало значения максимального прироста и убыли OCO в течение суток, равные +228 и –194 е.Д., имевшие место в декабре и январе соответственно. Для 2010 г. эти значения составили, соответственно, +185 (14 апреля) и –212 е.Д. (29 марта), для 2011 г. – +177 (16 января) и –172 е.Д. (18 февраля). Очевидно, что в 2010 г. произошло смещение максимумов с зимнего периода на весенний. Это же относится и к годовому ходу количества случаев с $|\Delta OCO| > 100$ е.Д., представленному в табл. 1. В 2009 г. максимум такой «экстремальной» изменчивости OCO приходился на февраль, в то время как в 2010 г. он был характерен для марта–апреля, а в 2011 г. – для февраля–марта. Такие различия являются отражением особенностей циркуляционных процессов, особые аномалии которых были отмечены в 2010 г. в умеренных и высоких широтах северного полушария [8]. Что касается теплого

периода (с июля по октябрь), то эти месяцы характеризуются только отдельными случаями превышения $|\Delta\text{OSO}|$ значения 100 е.Д. Отметим, что ни в одном сентябре в период 2009–2011 гг. эпизодов с $|\Delta\text{OSO}| > 100$ е.Д. зафиксировано не было.

Таблица 1

Число случаев (N) и процент случаев (%) изменений ОСО более чем на 100 е.Д. в сутки по месяцам в полосе 30–70° с.ш.

Знак Δ		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2009 г.													
«-»	N	1024	2159	1020	658	13	11	0	1	0	0	66	202
	%	19,8	41,8	19,7	13,0	0,3	0,2	0	0	0	0	1,3	4,0
«+»	N	830	1409	644	556	147	3	0	0	0	7	59	276
	%	21,0	35,7	16,3	14,5	3,7	0,1	0	0	0	0,2	1,5	7,0
2010 г.													
«-»	N	545	398	1706	1175	46	14	0	0	0	1	47	191
	%	13,2	9,7	41,4	28,5	1,1	0,3	0	0	0	0	1,1	4,6
«+»	N	485	592	1572	1277	70	13	3	0	0	0	142	248
	%	11,0	13,4	35,7	29,0	1,6	0,3	0,1	0	0	0	3,2	5,6
2011 г.													
«-»	N	333	1354	1617	571	10	6	0	0	0	0	17	369
	%	7,8	31,7	37,8	13,4	0,2	0,1	0	0	0	0	0,4	8,6
«+»	N	361	2480	1071	141	104	0	0	0	0	0	114	476
	%	7,6	52,2	22,6	3,0	2,2	0	0	0	0	0	2,4	10,0

В табл. 2 представлено распределение случаев «экстремальных» междусуточных изменений озона по регионам в пределах широтной полосы 30–70° с.ш. Анализ показывает, что в целом в 2009 г. во всей широтной полосе чаще регистрировалось падение ОСО более чем на 100 е.Д. в сутки, чем такой же прирост, а общее число квадратов с такими значительными изменениями превысило 9000. Для 2010–2011 гг. количество квадратов, где ОСО уменьшалось за сутки более чем на 100 е.Д., было больше, чем квадратов, где оно увеличивалось. Общее их число составило 8615 в 2010 г. и 8994 в 2011 г. Что касается локализации таких ситуаций, то, опираясь на данные табл. 2, можно сделать следующие выводы. Для самых южных широт (30–40° с.ш.) их повторяемость минимальна, хотя в 2010 г. она в несколько раз превышала значения, наблюдаемые в 2009 и 2011 гг. В 2010 г. максимум эпизодов – более 40 % – наблюдался на 40–50° с.ш., в то время как в 2009 и 2011 г. он имел место севернее (50–60° и 60–70° с.ш. соответственно).

Исследование повторяемости случаев с $|\Delta\text{OSO}| > 100$ е.Д. в зависимости от долготы также обнаружило специфические отличия 2010 года. Для этого периода был характерен ярко выраженный минимум в атлантико-европейском секторе умеренных широт и столь же

отчетливый максимум (более половины случаев) в тихоокеанском регионе. Для двух других лет экстремумы выражены не столь явно.

Таблица 2

**Распределение случаев (N) междусуточных изменений общего содержания озона
более чем на 100 е.Д. по разным регионам**

N	Широта, град				Долгота, град			
	30–40	40–50	50–60	60–70	45–135	135–225	225–315	315–45
2009 г.								
«→» 5161	5,3	18,2	47,3	29,3	7,2	41,6	25,4	25,8
«+» 3924	9,5	21,4	45,3	23,8	14,8	24,6	36,3	24,3
2010 г.								
«→» 4213	10,7	43,9	27,5	17,8	10,0	57,7	27,2	7,1
«+» 4402	10,7	46,3	27,9	15,1	15,7	55,2	19,6	9,5
2011 г.								
«→» 4277	0,9	12,3	36,9	49,9	11,9	21,1	24,0	43,1
«+» 4717	3,2	9,7	43,4	43,6	13,2	26,6	31,5	28,7

Примечание: «→» означает падение ОСО, «+» – рост ОСО).

Отметим, что 2010 год памятен аномалиями летней циркуляции, которая выразилась в одном из самых продолжительных эпизодов атмосферного блокирования над европейской Россией. Однако аномалии циркуляционного режима 2010 года можно было проследить, начиная с зимы. В этот период отмечались экстремальные значения индекса североатлантического колебания и формирование ситуации внезапного стратосферного потепления в Арктической стратосфере [8]. С этой ситуацией был связан ряд случаев, отмеченных значительными изменениями ОСО. Так, эпизод возрастания ОСО на 115 е.Д. 26–27 января 2010 г. на 60–62° с.ш. вблизи гринвичского меридиана, сопровождающийся глубоким опусканием тропопаузы (на 7,4 км), совпал с центральной датой внезапного потепления.

Проведем анализ междусуточных синхронных изменений высоты тропопаузы, сопровождающих значительные изменения ОСО для каждого из трех лет. По данным 2010 г. было выявлено и проанализировано 12 эпизодов понижения ОСО более чем на 100 е.Д. в сутки и 15 – столь же резкого повышения (табл. 3). Для 2011 г. эти цифры составили 15 и 16 соответственно (табл. 4). Табл. 5 для 2009 г. (13 и 17 эпизодов соответственно), представленная в работе [2], здесь дополнена информацией о максимальных наклонах, характеризующих степень деформации поверхности тропопаузы.

Данные 2010–2011 гг. подтвердили полученный ранее [2] вывод о том, что случаи резких междусуточных колебаний ОСО как в ту, так и в другую сторону, часто связаны с развитием одного процесса. Это можно проследить на примере 27–28.02 2011 г. (эпизоды 7 и 25 в табл. 4) или 11–12.04.2010 г. (эпизоды 23 и 10 в табл. 3)/

Обратим внимание на тот факт, что эпизоды с $|\Delta\text{ОСО}| > 100$ е.Д., зафиксированные прибором ОМІ, подтверждаются другими источниками. Так, данные WOUDC (рис. 1) указывают на резкое уменьшение ОСО 6–7 марта 2011 г. (эпизод 9 табл. 4) и резкое увеличение 18–19 февраля 2010 г. вблизи Гринвича (эпизод 14 табл. 3). С другой стороны, эпизод 5 января 2010 г. вблизи 90° в.д. согласуется с зафиксированным на станции Красноярск озонметрической сети Росгидромета (56° с.ш., 93° в.д.) отклонением ОСО от нормы на 40 %, или на 3,2 единицы среднеквадратичного отклонения, наблюдавшимся 3 января [3]. К сожалению, это единственная российская озонметрическая станция, находящаяся довольно близко к референсному меридиану (90° в.д.).

Наиболее ярким подтверждением увеличения ОСО могут служить темные полосы на спутниковых изображениях в полосе пропускания водяного пара. Они соответствуют областям так называемых «стратосферных вторжений», когда сухой (и богатый озоном) стратосферный воздух опускается на тропосферные уровни. Как правило, это происходит на холодной стороне высотной фронтальной зоны, когда под действием развивающихся здесь поперечных циркуляций тропопауза прогибается, образуя «складку» [4]. Соответствующие «складкам» темные полосы на снимках узкие, в отличие от других обширных почти черных участков, характеризующих адвекцию сухого тропического воздуха, например из области Сахары. На рис. 2 приведены карты высоты тропопаузы и соответствующие им спутниковые изображения для вышеупомянутого эпизода 26–27 января 2010 г. вблизи гринвичского меридиана. Здесь отчетливо виден заток к северу, а затем к востоку обширного «языка» тропического воздуха с тропопаузой, достигающей высоты 15 км (в начале эпизода), и последующая его трансформация, завершающаяся «продавливанием» на юг воздушной массы с севера с характерными значениями высоты тропопаузы порядка 8 км. На 60 – 62° с.ш. максимальное понижение тропопаузы составило 7,4 км, а изменение ОСО сопровождалось приростом в 115 е.Д. за сутки. Серым цветом на картах высоты тропопаузы указаны зоны ее наиболее сильной деформации ($SL \geq 1^\circ$). Их форма и положение хорошо соответствуют заметным на спутниковых снимках темным полосам опускающегося стратосферного воздуха. Данный эпизод, совпавший с центральной датой стратосферного потепления [8], характеризовался нарушением зональной циркуляции вблизи 60 – 70° с.ш. над гринвичским меридианом в стратосфере и верхней тропосфере (от 300 до 50 гПа). На поверхности 300 гПа характер изогипс напоминает сигнатуру обрушения волн Россби, в то время как в средней

стратосфере (50 гПа) циркумполярный вихрь, согласно классической ситуации стратосферного потепления, расщепляется на две области низкого давления. Центр одной из них расположен над западным побережьем Канады, другой – над Средне-Сибирским плоскогорьем (рис. 3). Отметим, что барические градиенты в этой ситуации гораздо больше в восточном полушарии, чем в западном. Из-за перегруженности графическим материалом в работе не приводятся подобные карты для сроков начала и окончания эпизода стратосферного потепления, когда восстанавливается одноцентровой циркумполярный вихрь и квазизональный перенос в полярных широтах.

Среднее для каждого года число эпизодов с $|\Delta\text{ОСО}| > 100$ е.Д. на референсных долготах и соответствующие им средние междусуточные изменения ОСО и высоты тропопаузы представлены на рис. 4. Здесь обнаруживается специфическое распределение числа случаев N с $|\Delta\text{ОСО}| > 100$ е.Д. для каждого из рассматриваемых лет (рис. 4а). Обращает на себя внимание явная активность сильной междусуточной изменчивости озона в тихоокеанском секторе (180° д.) в 2010 г., в сравнении с двумя другими годами. Изменения ОСО за сутки в среднем составили 122 е.Д. – максимум на рис. 4б. Что касается высоты тропопаузы, то ее междусуточная изменчивость на этой долготе не была максимальной (рис. 4в). В то же время над Азией (90° в.д.) для всего рассматриваемого периода число эпизодов с $|\Delta\text{ОСО}| > 100$ е.Д. минимально. Для этих эпизодов характерно незначительное (в сравнении с другими меридианами) изменение высоты тропопаузы. В 2010 и 2011 гг. здесь были зафиксированы эпизоды, связанные только со значительным ростом ОСО, а эпизодов со значительным падением не было (табл. 3, табл. 4). Изменчивость среднего значения $\Delta\text{ОСО}$ по долготам в случаях $|\Delta\text{ОСО}| > 100$ е.Д. практически не выражена в 2011 г. и имеет отчетливые максимумы в 2010 и 2009 гг. на 180° и 0° широты соответственно. Для гринвичского меридиана характерно максимальное изменение высоты тропопаузы в рассматриваемых эпизодах, причем самые большие значения связаны с ее понижением и, соответственно, с увеличением озона. Отметим, что только для 0° и 90° з.д. наблюдается соответствие максимальных изменений $\Delta\text{ОСО}$ и $\Delta H_{\text{тр}}$ в течение трехлетнего периода исследования.

Хотя резкие изменения озона, как правило, связаны с миграцией зон больших градиентов высоты тропопаузы, не во всех случаях можно наблюдать ее значительную деформацию. В целом для периода 2009–2011 гг. повторяемость наклонов изэртелической поверхности 3,5 рви, превышающих 1° , то есть характеризующих «значительную» степень деформации тропопаузы, в среднем составляет 4,3–4,4 % для полосы $30\text{--}70^\circ$ с.ш. Это более чем на порядок превышает повторяемость случаев с $\Delta\text{ОСО} > 100$ е.Д. Однако если обратиться только к анализируемым случаям резких междусуточных изменений озона, то при этом

значительная деформация тропопаузы ($SL \geq 1^\circ$) отмечается примерно в 75 % эпизодов, что в десятки раз превосходит ее среднюю повторяемость в данной широтной полосе.

Отличия в изменении повторяемости $SL \geq 1^\circ$ по широте для трех лет незначительны – она уменьшается с юга на север примерно в 4 раза (табл. 6). Такая особенность связана с географическим положением и миграцией субтропического струйного течения, на холодной стороне которого имеет место крутой наклон тропопаузы. Что касается распределения по долготам, то здесь повторяемость $SL \geq 1^\circ$ практически не меняется как от сектора к сектору, так и от года к году. Установлено, что для всех эпизодов с $|\Delta OCO| > 100$ е.Д. всего в 25 % случаев наклоны тропопаузы в случаях резких изменений озона были менее 1° , а в 32 % случаев их величина превышала значение 2° . Максимальные углы наклона тропопаузы, превышающие 5° , отмечались в эпизоде резкого увеличения OCO , сопровождающегося опусканием тропопаузы на 7 км, 25–26 января 2009 г. Чаще всего сильная деформация тропопаузы наблюдалась при резком увеличении озона в 2009 г. – здесь во всех 13 случаях максимальные углы наклона превышали 1° . Наибольшее количество эпизодов, в которых $SL < 1^\circ$, приходится на сроки 6 и 18 ч ВСВ. Это может быть связано с более низким качеством объективного анализа на высотах в эти сроки, поскольку стандартными сроками аэрологического зондирования являются 00 и 12 ч ВСВ. Случаи отсутствия $SL \geq 1^\circ$ означают, как правило, монотонное изменение высоты тропопаузы, в то время как остальные ситуации связаны с колебаниями зон больших градиентов высоты тропопаузы вблизи референсных меридианов. Отметим, что в течение суток строгая «монотонность» очень редко выдерживается. Чаще всего монотонное изменение соблюдается в течение 18 часов (3 срока подряд от начала эпизода).

Таблица 6

Повторяемость значительных углов наклона тропопаузы ($SL > 1^\circ$) в различных регионах северного полушария (по 4-срочным данным)

N	Широта, град				Долгота, град			
	30–40	40–50	50–60	60–70	45–135	135–225	225–315	315–45
2009 г.								
968383	48,0	26,2	14,7	11,1	25,8	24,3	26,5	23,5
2010 г.								
930654	43,0	29,6	16,3	11,1	23,6	23,7	27,8	24,9
2011 г.								
958938	42,0	29,7	16,5	11,8	23,9	22,4	28,2	25,5

Примеры квазимонотонного и немонотонного изменения высоты тропопаузы для некоторых эпизодов 2010 и 2011 гг. представлены на рис. 5.

Таким образом, выводы работы [2], основанные на данных 2009 г., подтверждены на более обширном материале. Для всего периода исследований в 90 % случаев изменение ОСО в течение суток не превышает 40 е.Д. Межгодовая изменчивость повторяемости случаев с $|\Delta\text{ОСО}| > 100$ е.Д. невелика и составляет 0,25–20,27 %. Экстремальные значения изменения общего содержания озона в течение суток могут превышать 200 е.Д. (в 2009 и 2010 гг.). Наряду с общими чертами разных лет (повторяемость междусуточных изменений ОСО, резкие изменения ОСО при немонотонном изменении высоты тропопаузы с противоположным знаком, значительная деформация тропопаузы, сопровождающая большинство эпизодов), можно отметить некоторую специфику 2010 года. Резкие и многодневные нарушения зональной циркуляции в тропосфере и стратосфере, отмеченные в 2010 г. (стратосферное потепление, летний блокинг) привели к увеличению повторяемости эпизодов с $|\Delta\text{ОСО}| > 100$ е.Д. вблизи референсного меридиана 180° д., а также к сдвигу максимума повторяемости таких эпизодов с зимних месяцев на апрель–май.

Автор выражает глубокую благодарность Е.Н. Скриптуновой за помощь в обработке информации.

Список использованных источников

1. Иванова А.Р. Наклон тропопаузы как характеристика ее деформации // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 2. – С. 17–28.
2. Иванова А.Р. Динамика тропопаузы для случаев резкого изменения озона в умеренных широтах Северного полушария // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 7. – С. 13–25.
3. Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н. Содержание озона над территорией Российской Федерации в первом квартале 2010 г. // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 5. – С. 121–124.
4. Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 206 с.
5. Шакина Н.П., Борисова В.В. Опыт использования потенциального вихря для расчета высоты тропопаузы // Метеорология и гидрология. – 1992. – № 9. – С. 5–19.
6. Bethan S., Vaughan G., Reid S.J. A comparison of ozone and thermal tropopause heights and the impact of tropopause definition on quantifying the ozone content of the troposphere // Quarterly J. Royal Meteorol. Society. – 1996. – Vol. 122. – P. 929–944.

7. Canziani P.O., Compagnucci R.H., Bischoff S.A., Legnani W.E. A study of impacts of tropospheric synoptic processes on the genesis and evolution of extreme total ozone anomalies over Southern South America // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 107. – P. 4741–4766.

8. Dörnbrack A., Pitts M.C., Poole L.R., Orsollini Y.J., Nishii K., Nakamura H. The 2009–2010 Arctic stratospheric winter – general evolution, mountain waves, and predictability of an operational weather forecast model // *Atmos. Chem. Phys.* . – 2012. – Vol.12. – P. 3659–3675.

9. Evtushevsky O.M., Grytsai A.V., Klekociuk A.R., Milinevsky G.P. Total ozone and tropopause zonal asymmetry during the Antarctic spring // *J. Geophys. Res.* – 2008. – Vol. 113. – D00B06. – P. 1–12.

10. Hoinka K. P., Claude H., Köhler U. On the correlation between tropopause pressure and ozone above Central Europe // *Geophys. Res. Let.* – 1996. – Vol. 23 (14). – P. 1753–1756.

11. Hudson R. D., Frolov A. D., Andrade M. F., Follette M.B. The total ozone field separated into meteorological regimes. Part I: defining the regimes // *J. Atm. Sci.* – 2003. – Vol. 60. – P. 1669–1677.

12. Steinbrecht W., Claude H., Köhler U., Hoinka K. P. Correlations between tropopause height and total ozone: Implications for long-term changes // *J. Geophys. Res.* – 1998. – Vol. 103. – P. 19183–19192.

Поступила в редакцию 31.10.2013 г.

Эпизоды резкого (>100 е.Д.) уменьшения (вверху) и увеличения (внизу) ОСО
в течение суток в полосе 30–70° с.ш. в 2010 г.

Номер эпизода	Период	Долгота, град	Широта, град.	$\Delta\text{ОСО}_{\text{max}}$, е.Д.	$\Delta\text{H}_{\text{тр}}$, км	SL_{max} , град
1	11–13.02	180	42–46	–115	2,9	1,2
2	15–17.02	180	46–51	–133	4,1	1,0
3	24–25.02	270	57,60	–103	2,2	0,7
4	15–17.03	180	42–50,59,61	–128	4,8	1,4
5	21–22.03	180	41–42	–104	4,2	1,0
6	1–3.04	180	45–47,52,53	–130	1,7	1,0
7	3–4.04	270	40–42	–119	3,5	1,4
8	8–9.04	270	39–46	–132	4,8	2,8
9	8–9.04	180	47	–104	4,2	1,3
10	12–13.04	0	68–70	–106	3,7	3,6
11	13–15.04	180	48–54	–139	1,3	1,4
12	28–29.11	180	62	–102	1,5	0,7
13	5–6.01	90	55–57	104	–0,6	0,5
14	26–27.01	0	60–62	115	–7,4	2,3
15	4–5.02	0	52–54	110	–2,2	1,0
16	18–19.02	0	70	131	–0,1	1,0
17	1–3.03	180	49–50,54	108	–2,8	0,8
18	8–10.03	180	48–50	118	–3,6	0,7
19	20–21.03	180	45–47,58	121	–2,8	1,3
20	27–28.03	90	53–54	112	–3,8	1,5
21	31.03–1.04	180	42	142	–4,9	0,5
22	1–03.04	180	46,48, 51,52	122	–1,0	0,9
23	11–12.04	0	67–69	110	–3,9	3,1
24	15–16.04	180	55–59	123	–5,4	1,4
25	18–20.04	180	42–48	135	–4,8	1,1
26	2–3.05	180	39–40	122	–1,5	1,3
27	2–3.09	180	59	131	–0,1	1,2

Эпизоды резкого (>100 е.Д.) уменьшения (вверху) и увеличения (внизу) ОСО
в течение суток в полосе 30–70° с.ш. в 2011 г.

Номер эпизода	Период	Долгота, град	Широта, град.	$\Delta\text{ОСО}_{\text{max}}$, е.Д.	$\Delta\text{H}_{\text{гр}}$, км	SL_{max} , град
1	10–11.02	0	61–63	–121	2,4	2,7
2	10–11.02	180	64	–102	1,8	0,9
3	12–14.02	180	59–62	–109	5,4	1,1
4	17–18.02	0	39–41	–105	4,3	1,8
5	18–20.02	180	56–70	–131	4,6	1,8
6	22–23.02	0	45–60	–145	5,0	1,1
7	27–28.02	0	69–70	–116	5,0	2,6
8	2–3.03	270	48–49	–118	3,0	1,0
9	6–7.03	270	54–61	–125	1,3	0,8
10	19–20.03	270	65–66	–110	0,4	0,7
11	22–24.03	0	67,70	–111	4,7	3,0
12	8–9.04	270	57	–109	1,9	0,6
13	3–4.12	180	47–49,60,61	–119	1,0	2,2
14	4–5.12	270	55	–112	0,3	2,8
15	9–10.12	0	56–57	–108	3,7	3,2
16	17–18.01	0	63	110	–0,6	1,0
17	19–20.01	270	55–61	127	–3,1	0,5
18	8–9.02	270	47	102	–1,5	1,4
19	9–10.02	90	53–59	125	–1,9	0,9
20	13–14.02	0	47–53	106	–4,1	1,6
21	14–16.02	180	57–68	144	–2,5	3,0
22	17–18.02	270	68–69	102	–1,0	0,8
23	23–24.02	270	54–57	137	–0,8	0,8
24	27–28.02	270	55–56	115	–0,4	2,6
25	28.02–01.03	0	64–69	148	–5,7	1,7
26	3–4.03	0	67–69	109	–4,8	1,1
27	15–16.03	90	55–58	111	–3,4	2,6
28	27–28.03	180	67–70	108	–3,2	0,7
29	6–7.12	270	56	108	–3,1	1,1
30	16–17.12	180	56	114	–0,7	0,7
31	21–22.12	270	51–52	112	–1,7	2,0

Эпизоды резкого (>100 е.Д.) уменьшения (вверху) и увеличения (внизу) ОСО
в течение суток в полосе 30–70° с.ш. в 2009 г.

Номер эпизода	Период	Долгота, град	Широта, град.	$\Delta\text{ОСО}_{\text{max}}$, е.Д.	$\Delta\text{H}_{\text{гр}}$, км	SL_{max} , град
1	7–8.01	90 з.д.	39–40	–112	6,0	0,9
2	26–27.04	180	41–42	–114	7,2	0,8
3	31.01–1.02	180	42	–104	3,2	3,5
4	10–12.02	180	44–56	–132	3,6	1,8
5	26–27.1	0	44–54	–121	4,7	3,0
6	11.03–12.03	90 в.д.	48–49	–105	5,2	0,6
7	22–23.04	180	49–51	–106	2,9	1,0
8	8–9.02	90 з.д.	49–59	–141	3,4	4,8
9	20–23.02	180	51	–103	2,6	3,0
10	17–18.01	90 в.д.	56	–102	0,3	1,3
11	7–8.03	90 з.д.	53–58	–136	3,5	2,5
12	24–25.07	90 з.д.	55	–102	0,9	1,0
13	16–17.04	180	60	–119	6,0	0,8
14	14–15.03	180	57–62	–132	5,1	2,0
15	21–22.01	0	60–64	–141	4,0	1,4
16	26–27.01	180	57	–114	3,9	1,0
17	21–22.03	90 з.д.	63	–102	1,8	1,0
18	20–21.01.09	0	32–38	122	–8,9	2,9
19	11–12.02.09	90 в.д.	39	107	–3,6	2,6
20	25–26.01.09	0	36,37,44,45	103	–7,0	5,1
21	29–30.01.09	90 з.д.	44,48,49	131	–0,6	3,9
22	16–17.05.09	180	48–57	114	–4,6	3,5
23	24–25.12.09	90 в.д.	49–50	109	–3,2	1,0
24	22–23.01.09	90 з.д.	49	114	–2,5	1,0
25	25–27.04.09	180	60,62	105	–0,7	1,5
26	19–20.01.09	90 в.д.	50	106	–0,6	1,3
27	8–10.03.09	90 з.д.	48,54	107	–4,6	2,5
28	25–26.02.09	180	57–60	111	–1,1	2,6
29	6–7.02.09	90 з.д.	58	112	–1,8	2,2
30	23–24.03.09	90 з.д.	58	112	–2,3	1,0

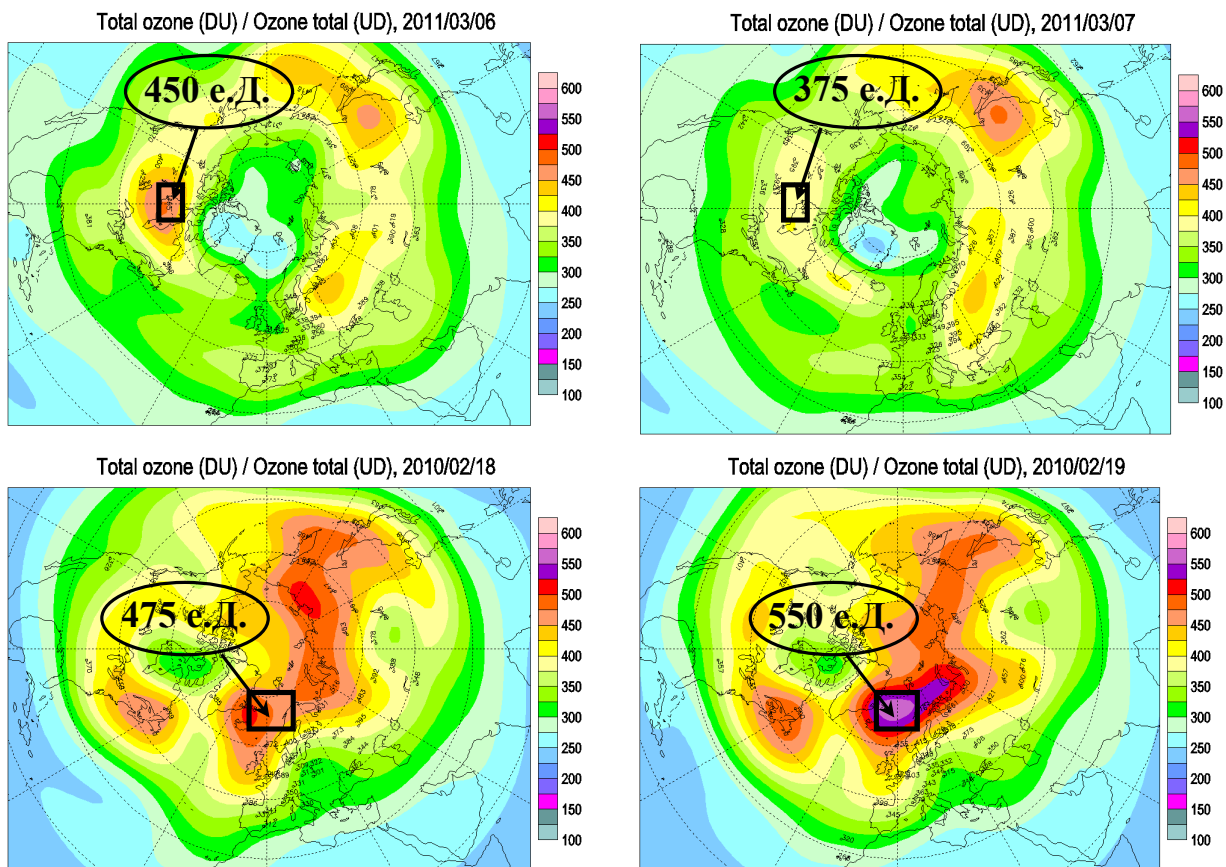
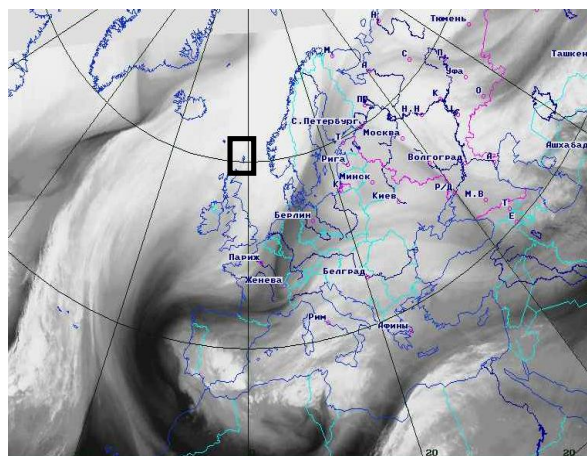
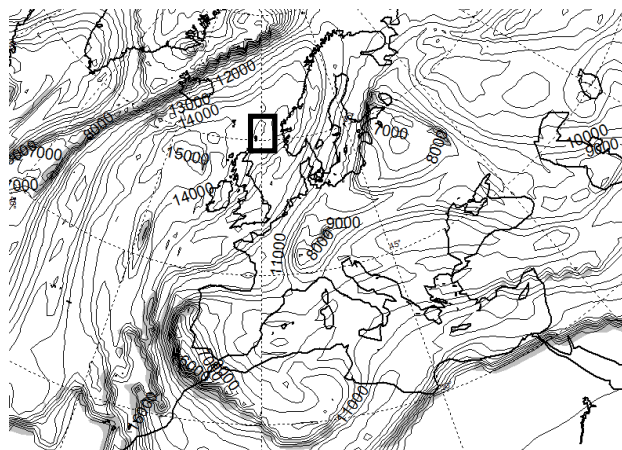
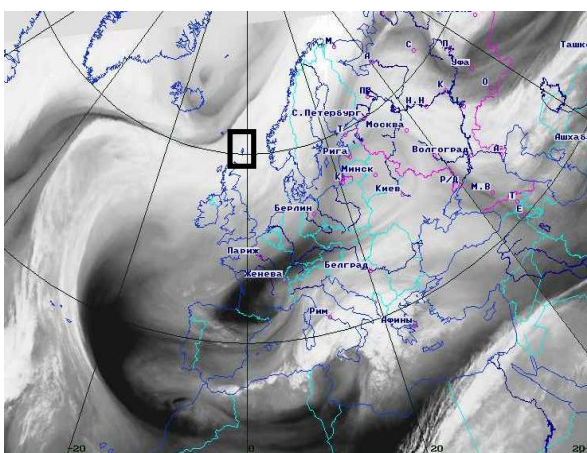
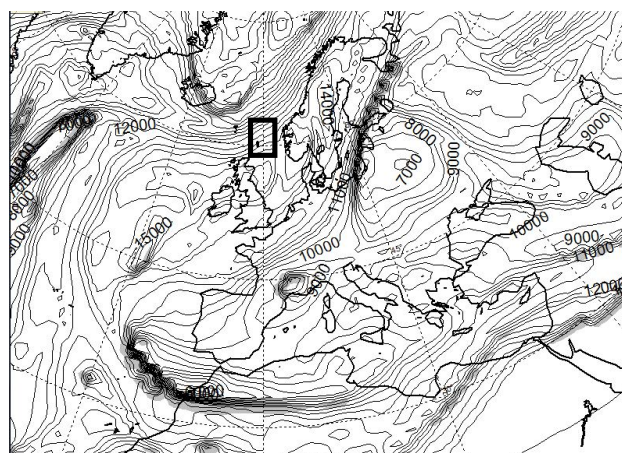


Рис. 1. Эпизоды значительного изменения ОСО в течение суток в сторону уменьшения (вверху) и увеличения (внизу) по данным WOUDC. Область изменений выделена прямоугольником.

26.01.2010 12 BCB



27.01.2010 00 BCB



27.01.2010 12 BCB

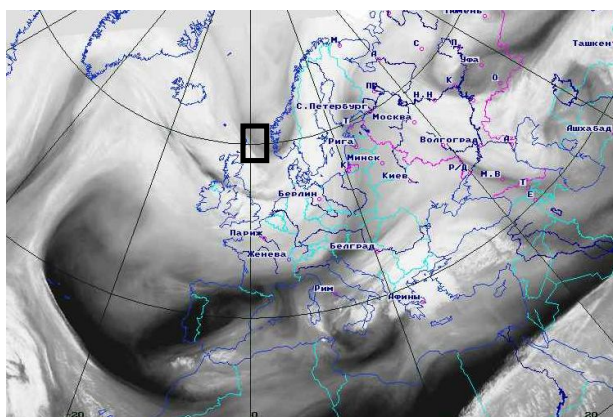
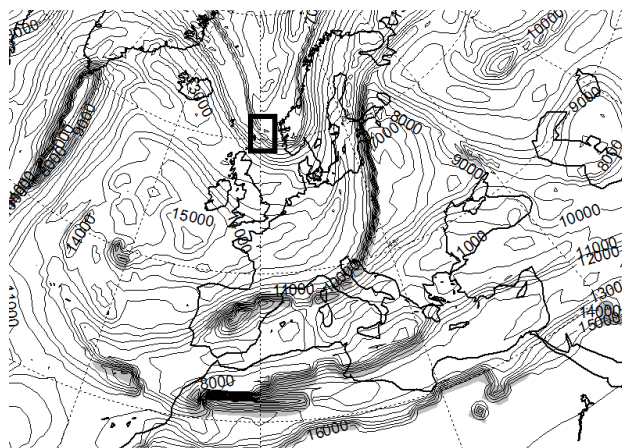


Рис. 2. Спутниковые изображения в полосе пропускания водяного пара (слева) и карты высоты тропопаузы (справа) для эпизода резкого увеличения ОСО на 60–62° с.ш. 26–27 января 2010 г. Серым цветом указаны области значительной деформации тропопаузы ($SL \geq 1^0$).

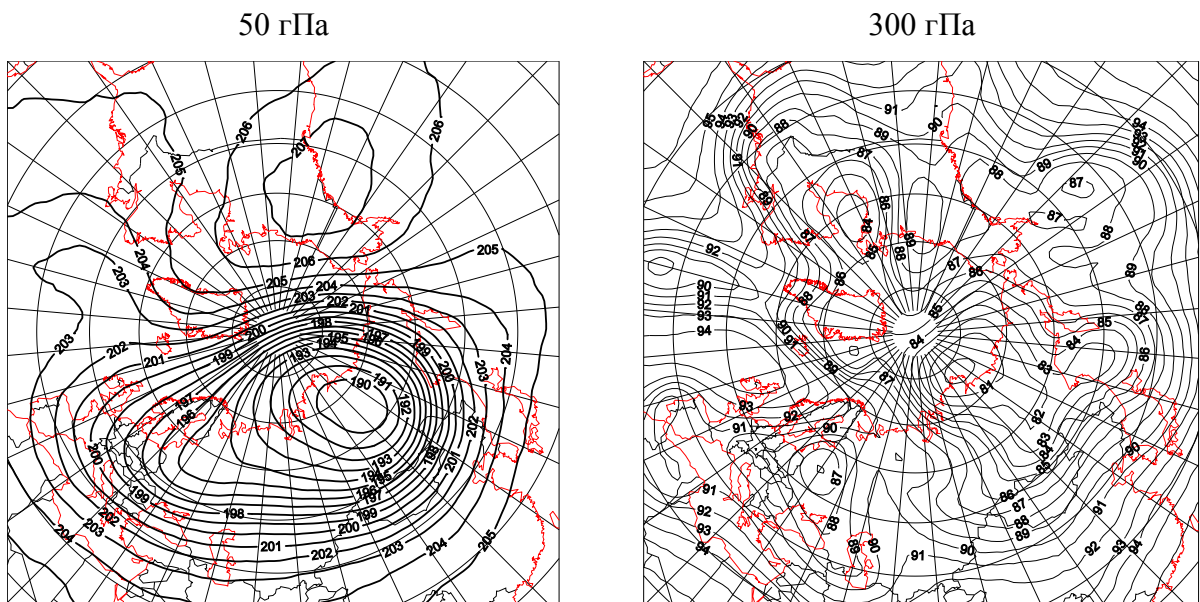
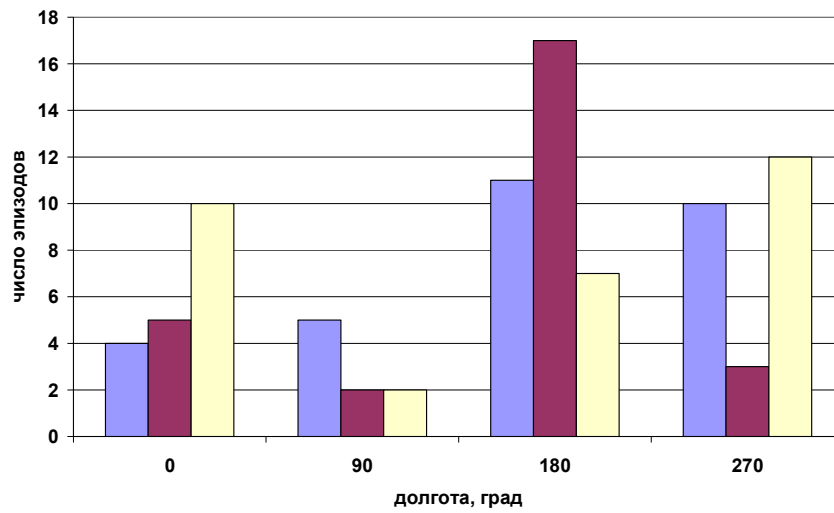
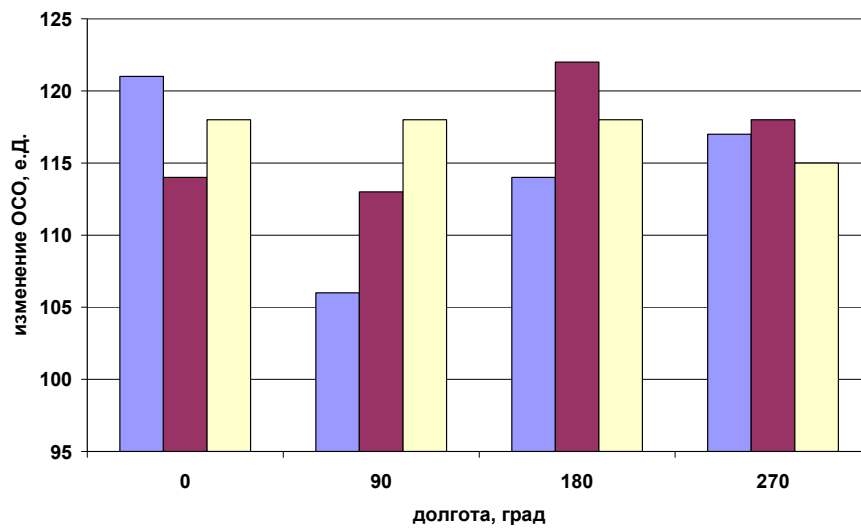


Рис. 3. Карты геопотенциальных высот (в сотнях декаметров) поверхностей 50 гПа и 300 гПа 27.01.2013 за 12 ч ВСВ.



а



б

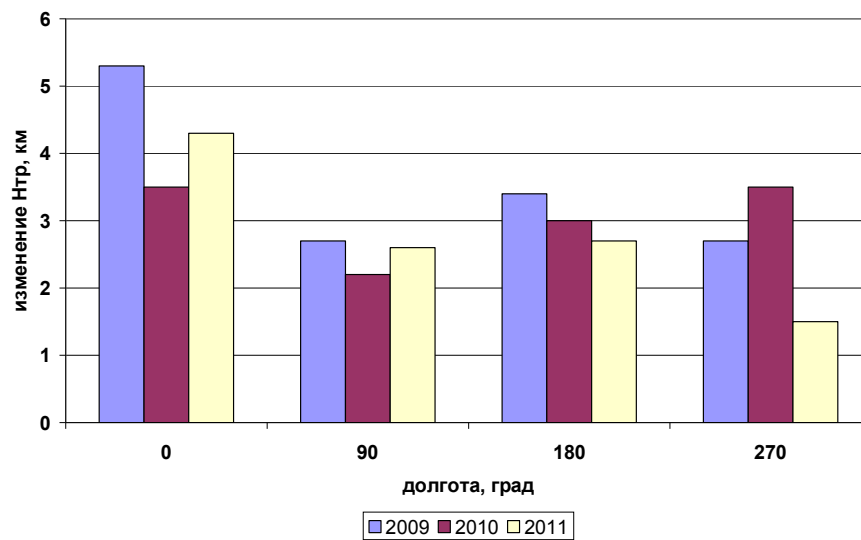


Рис. 4. Число эпизодов с $|\Delta OCO| > 100$ е.Д. (а) на референсных долготах и средние значения в этих эпизодах $|\Delta OCO|$ (б) и $|\Delta N_{тр}|$ (в) для 2009–2011 гг.

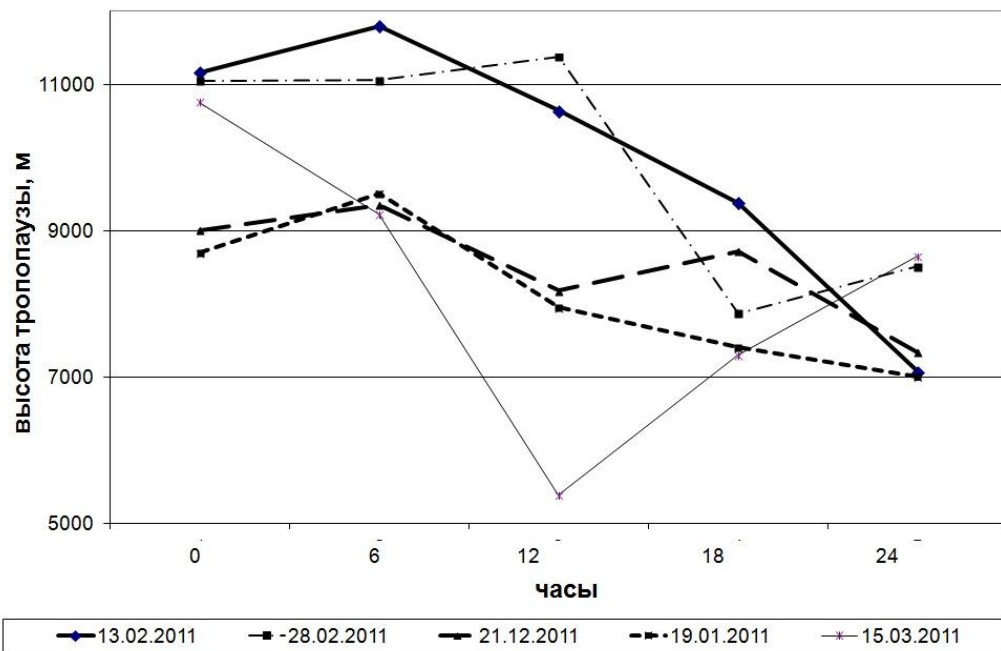
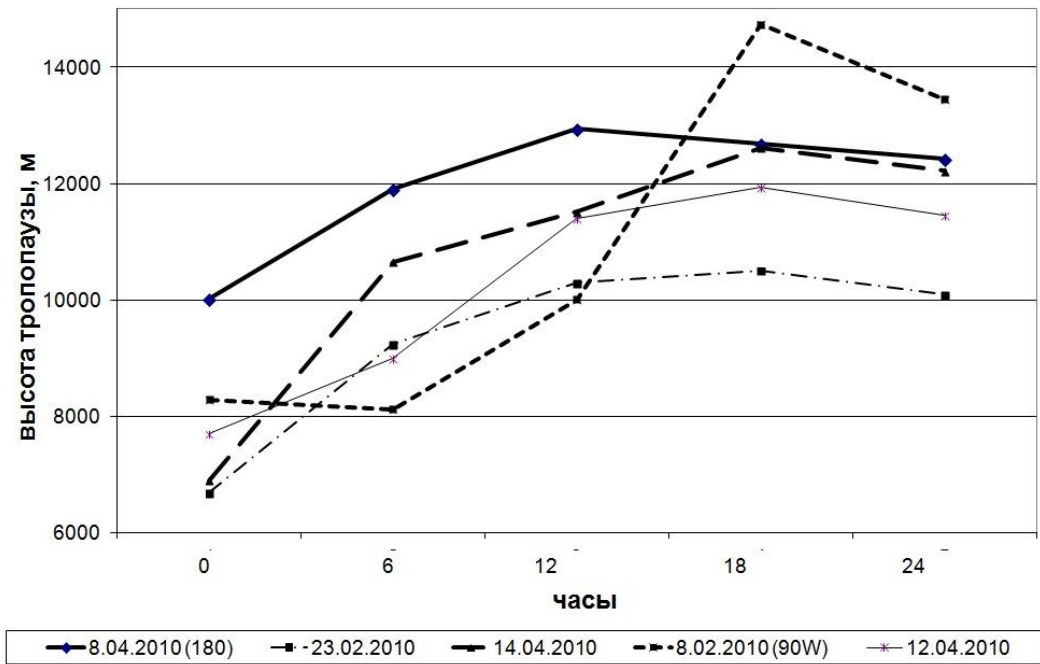


Рис. 5. Примеры изменения высоты тропопаузы в течение суток для некоторых эпизодов с $|\Delta\text{ОСО}| > 100$ е.Д. в 2010 г. (слева) и 2011г. (справа).