



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Исследование изменчивости озонового слоя различного временного
масштаба»

Исполнитель Водорезова Анна Николаевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«11» июня 2022 г.

Санкт-Петербург
2022

Содержание

Введение.....	3
1. Теоретические основы измерения общего содержания озона в атмосфере Земли.....	5
1.1. Образование, значение и распределение озона в атмосфере Земли.....	5
1.2. Тропосферный озон.....	12
1.3. Методы измерения стратосферного озона.....	13
2. Исследование изменчивости озонового слоя различного временного масштаба.....	20
2.1. Изменение ОСО в течение года.....	20
2.2. Сравнение среднегодовых значений ОСО.....	24
2.3. Анализ годовой изменчивости общего содержания озона над северным географическим полюсом.....	30
Заключение.....	57
Список использованных источников.....	59

ВВЕДЕНИЕ

Даже низшие формы жизни очень сильно страдают от избытка ультрафиолетовой радиации, того избытка, какой мог бы быть в спектре достигающего земной поверхности солнечного излучения в отсутствие озона в атмосфере. Ультрафиолетовая радиация разлагает хроматин клеточного ядра и препятствует его делению, т.е. размножению клеток. В море жизнь защищена от ультрафиолетового излучения непрозрачной для него водой и потому смогла зародиться задолго до появления озонового слоя в атмосфере. Со временем озон, ослабляя ультрафиолетовую радиацию, сделал возможной жизнь и на суше.

Стратосферный озон, находящийся высоко над землей, поглощает «жесткое» ультрафиолетовое излучение Солнца и защищает от его губительного воздействия все живые организмы. Истощение озонового слоя вызывает существенные изменения в радиационном балансе атмосферы.

Тропосферный (приземный) озон считается вторичным загрязнителем. По естественным причинам озон может содержаться в тропосфере в небольших количествах, но увеличение его концентраций говорит о сильном загрязнении воздуха. Большие концентрации озона в приземном слое атмосферы подвергает опасности здоровье людей, животных и растений. В связи с этим всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) включила озон в перечень соединений, концентрации которых определяют качество воздуха.

Так как озон химически очень активен, то время существования его молекул не велико. В присутствии катализаторов и без того малое время существования молекулы озона значительно сокращается.

Постоянный мониторинг состояния озонового слоя проводится с целью своевременного обнаружения аномалий ОСО, оценки влияния антропогенных факторов на озоновый слой, оценки эффективности принятых с целью охраны озонового слоя мер и т.д.

В Российской Федерации проведение регулярных измерений общего содержания озона (ОСО) осуществляет Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Ежедневные измерения ОСО на территории Российской Федерации осуществляются с помощью фильтровых озонметров М-124 на сети в состав которой входят 28 станций.

Исследования озона стали наиболее актуальны в связи с уменьшением общего содержания озона в атмосфере. Уменьшение толщины *озонового слоя* приводит к увеличению количества ультрафиолетового излучения Солнца, достигающего поверхности Земли, нарушению теплового баланса планеты. С увеличением доли ультрафиолетовой составляющей в излучении, доходящем до поверхности планеты, связывают рост числа раковых заболеваний кожи у людей и животных. Поэтому, исследование содержания озона в атмосфере является актуальной задачей.

Целью данной работы является исследование изменения общего содержания озона в атмосфере.

Задачи исследования:

- изучение литературы по проблеме изменения содержания озона в атмосфере;
- анализ годового хода ОСО на разных широтах;

Объектом исследования является атмосферный озон, а предметом исследования является общее содержание озона и его изменения.

ВКР бакалавра состоит из введения, двух глав, заключения.

В первой главе, состоящей из трех подглав, изложены сведения о химических свойствах озона, его роли и распределении в толще атмосферы, а так же о методах его измерения.

Во второй главе произведен анализ данных спутниковых измерений общего содержания озона в атмосфере Земли, а так же анализ карт распределения озона над полярными широтами северного полушария.

1 Теоретические основы измерения общего содержания озона в атмосфере Земли

1.1. Образование, значение и распределение озона в атмосфере Земли

Озон – это аллотропная модификация кислорода, в состав одной молекулы озона входят три атома кислорода. Это вещество может существовать в трех агрегатных состояниях: голубой газ, жидкость цвета индиго с температурой кипения примерно -120°C и темно-фиолетовые, почти черные, кристаллы с температурой плавления около -197°C . Имеет резкий запах.

Озон очень неустойчив и обладает очень сильной окислительной способностью. В небольших концентрациях в воздухе и при невысокой температуре озон распадается сравнительно медленно, но при повышении температуры скорость разложения озона растет. Скорость разложения озона также значительно увеличивается в присутствии катализаторов. Ими могут быть и газы (например, оксид азота, хлор), и многие твердые вещества.

Формирование молекул озона в стратосфере происходит в результате воздействия ультрафиолетового излучения Солнца, под воздействием которого, молекулы кислорода распадаются на атомы кислорода, которые в дальнейшем взаимодействуют с нераспавшимися молекулами кислорода образуя молекулу озона.

Наиболее интенсивно озон поглощает солнечную радиацию, со значениями длин волн в пределах, так называемой, полосы Гартли (200-320 нм).

Для описания суммарного распределения озона в атмосфере используется параметр ОСО (общее содержание озона). $\text{ОСО} = X(\text{O}_3)$ – толщина слоя озона в вертикальном столбе атмосферы, может выражаться в сантиметрах, но как правило выражается в единицах Добсона $1 \text{ е.Д.} = 10^{-3} \text{ см}$.

Поглощая коротковолновую солнечную радиацию, озон разогревает стратосферу, поэтому в ней наблюдается отрицательный вертикальный температурный градиент, т.е. температура с высотой растет, тогда как в тропосфере температура с высотой, как правило, понижается. В средних широтах максимальные концентрации озона находятся на высоте 20-25км, в тропических широтах 24-27 км, а в полярных 13-18. На этих уровнях содержится до 75% всего атмосферного озона.

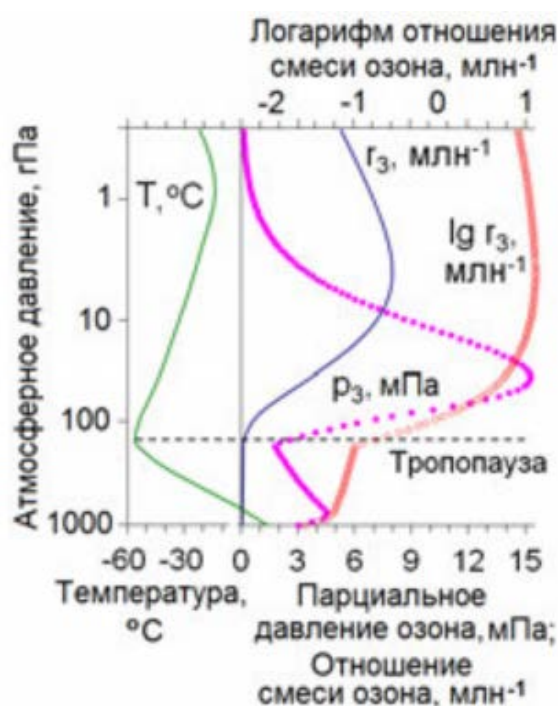


Рисунок 1.1 – Типичное вертикальное распределение парциального давления озона p_3 , мПа, отношения смеси озона r_3 , млн⁻¹, его десятичного логарифма $\lg r_3$, а также температуры T , °C [14]

Свойство озона поглощать коротковолновую радиацию играет также большую роль для живых существ, так как влияние губительно для живых существ, населяющих нашу планету. Коротковолновая радиация способна оказывать бактерицидный эффект, при воздействии на животных или на человека может приводить ожогам или даже к мутациям в клетках. В связи с

этим мониторинг озонового слоя является важной частью мониторинга окружающей среды.

В середине 80х годов двадцатого века было обнаружено, что озоновый слой начал истончаться, что сильно взволновало мировое сообщество, побудив его разработать ряд мер, предназначенных для охраны озонового слоя.

В 1985 году в Вене была принята Конвенция об охране озонового слоя, в которой подчеркивалось, что истончение озонового слоя будет иметь последствия, угрожающие окружающей среде и здоровью людей. На конвенции также была обозначена необходимость дальнейшего наблюдения за озоновым слоем, изучение влияния изменений озонового слоя на климат Земли, изучение влияния изменения интенсивности УФ-Б излучения на используемые человеком искусственные материалы и т.д. Был установлен перечень химических веществ, оказывающих влияние на озоновый слой (в числе прочих окись углерода, двуокись углерода, закись азота, метан, хлористые вещества и т.д.), а также участники конвенции пришли к соглашению об обмене социально-экономической и коммерческой информации о веществах, вошедших в список влияющих на озоновый слой.

В 1987 году 198 стран подписали Монреальский протокол, целью которого было регулирование производства и использования около 100 химических веществ, способствующих разрушению озонового слоя.

Количество озона в атмосфере может варьироваться от года к году в зависимости от равновесия между взаимосвязанными и одновременно протекающими радиационными, химическими и динамическими процессами образования и разрушения озона, но в среднем по земному шару общее содержание озона держится около значения 300 ед.Д. Аномально низкими считаются значения ОСО ниже 220 ед.Д., а области, в которых значение ОСО падает ниже 220 ед.Д. называют озоновыми дырами. Антарктическая озоновая дыра ежегодно появляется над южным полюсом в период с августа

по декабрь и может иметь площадь до 30 млн.км². Более мелкие и не такие продолжительные (до недели) аномалии называют озоновыми мини-дырами.

В [14] говорится о том, что главным образом динамика атмосферы влияет на положение тропопаузы. ОСО уменьшается при повышении положения тропопаузы, т.е. при уменьшении толщины зоны с высоким парциальным давлением озона. Химическое же разрушение озона происходит, когда внутри мощного, устойчивого циркумполярного вихря температура на высотах 15-24 км падает ниже -78 °С, благодаря чему на этих высотах, с участием молекул хлора и брома, образуются полярные стратосферные облака, на частицах которых и разрушается озон [14, 16].

Значение общего содержания озона обычно меньше в период западной фазы квазидвухлетнего колебания в экваториальной стратосфере, которая, как правило, приводит к усилению полярного стратосферного вихря.

Квазидвухлетним колебанием или квазидвухлетней цикличностью называют атмосферный процесс, происходящий в атмосфере экваториальных широт, суть которого заключается в том, что в течение, примерно, года в слое от 18 до 35 км господствует восточный зональный перенос (восточная фаза), а в течение следующего - западный зональный перенос. Схема квазидвухлетнего колебания представлена на рисунке 1.2.

Также с областями низкого ОСО связаны блокирующие антициклоны в [18] автор связывает это с адвекцией субтропического воздуха в тыловой части антициклона и с подъемом тропопаузы.

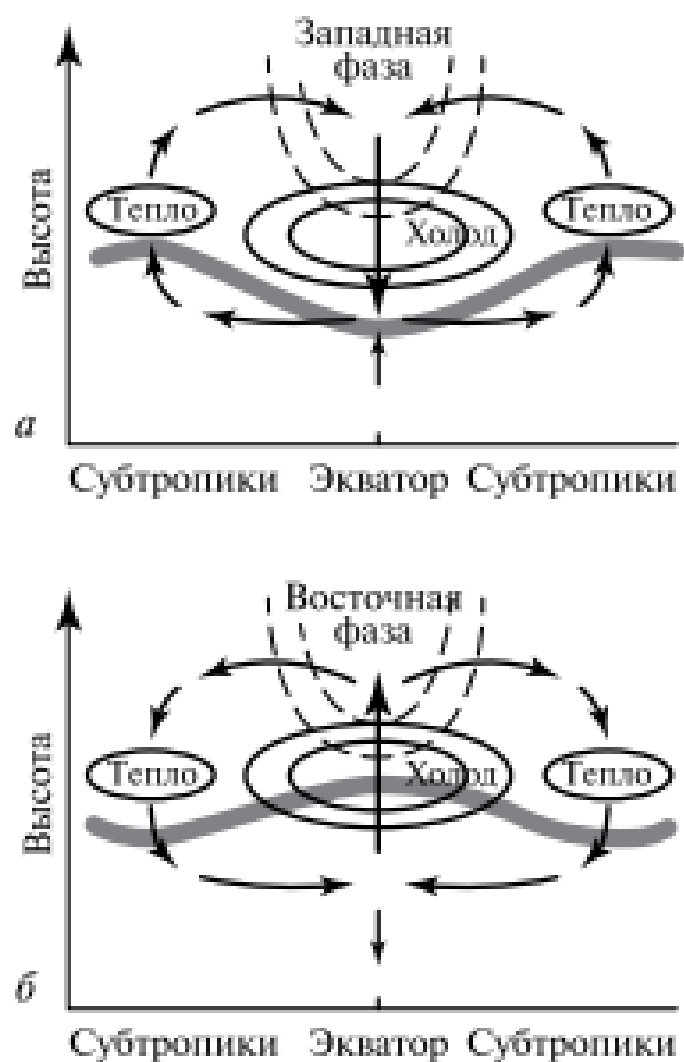


Рисунок 1.2 – Схема меридиональной циркуляции при западной (а) и восточной (б) фазе КДК зонального ветра; штриховые линии — изолинии скорости зонального ветра; сплошные — отклонения изотерм; толстые серые — тропопауза [17]

На рисунках 1.3 и 1.4 представлено распределение озона при разных фазах КДК.

Total ozone (DU) / Ozone total (UD), 2010/08/09

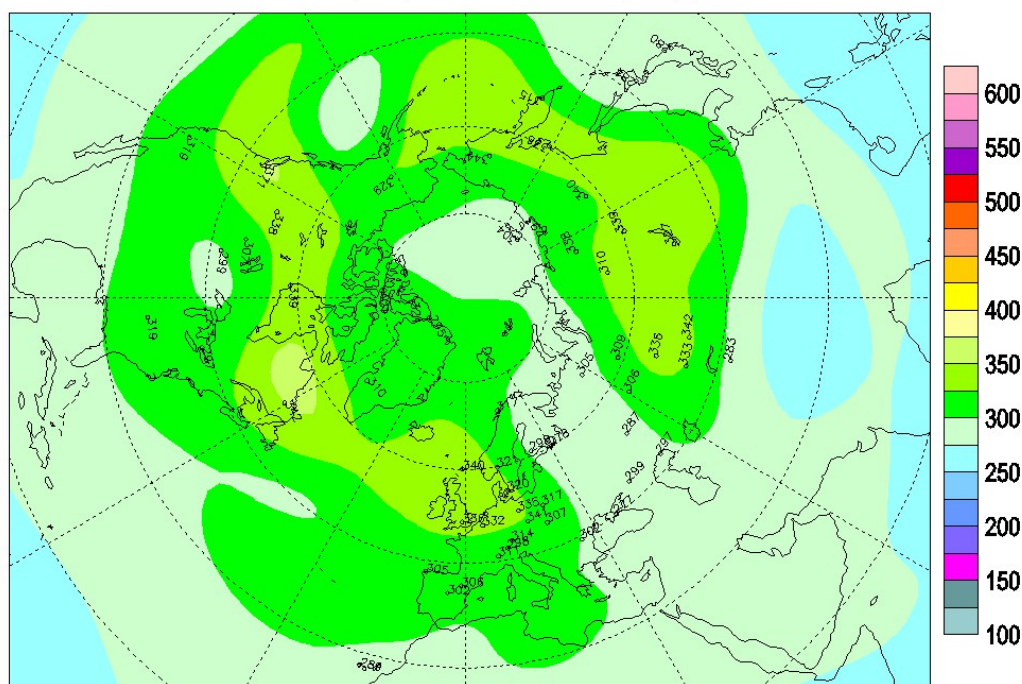


Рисунок 1.3 – Распределение ОСО 8 августа 2010 года над северным полушарием по данным WOUDC

Отрицательные аномалии озона не редкость, а вот положительные аномалии ОСО не такое частое явление (февраль-март 2018 над севером рф с максимумом над Таймыром(600 ед.Д)). В [12] авторы отмечают, что этому аномальному увеличению ОСО предшествовало внезапное стратосферное потепление, которому предшествовали тихоокеанские барические гребни и предполагают, что причиной роста ОСО могло стать смещение циркумполярного вихря в полярные широты западного полушария в условиях восточной фазы квазидвухлетнего колебания зональной составляющей экваториального стратосферного ветра.

Total ozone (DU) / Ozone total (UD), 2018/02/23

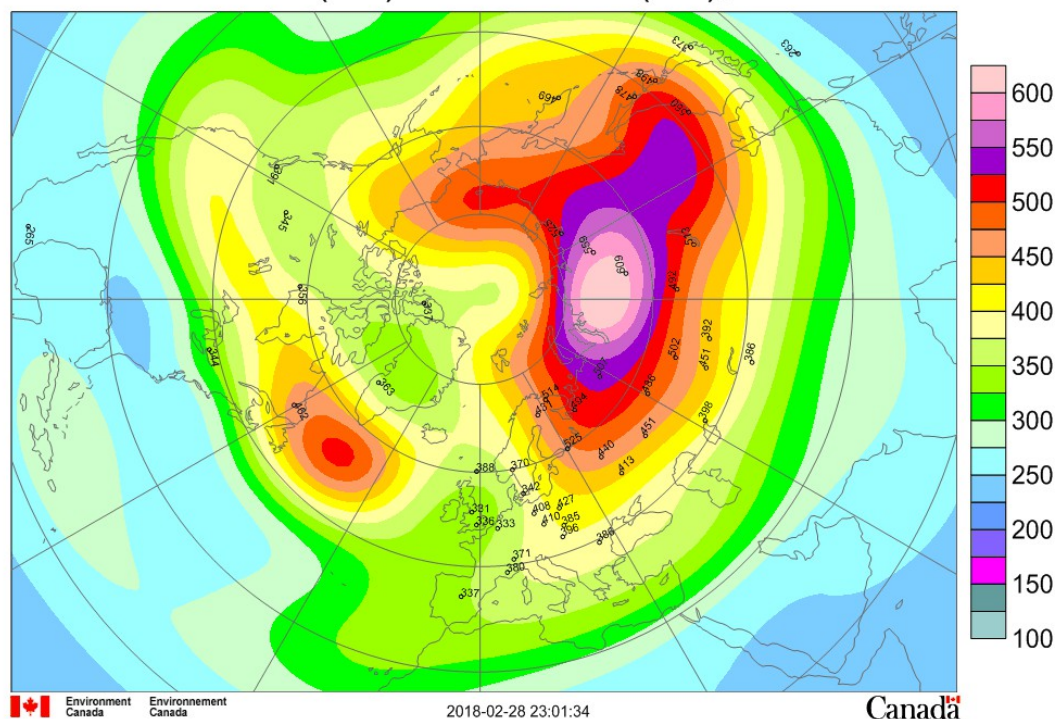


Рисунок 1.4 – Распределение ОСО 23 февраля 2018 года над северным полушарием по данным WOUDC

Внезапным стратосферным потеплением называют повышение температуры, иногда достигающее 50 С, в течение нескольких дней зимой в полярной или субполярной атмосфере, происходит, как правило, с января по март. Они оказывают влияние на полярный вихрь, приводя к его ослаблению, разделению или перемещению.

Возникновение внезапных стратосферных потеплений так же связывают с диссипацией планетарных волн в верхней стратосфере.

1.2. Тропосферный озон

Тропосферным озоном называют часть атмосферного озона, находящуюся в толще тропосферы. Находясь на большой высоте озон, благодаря своим свойствам, защищают живые организмы от воздействия коротковолновой радиации, но в непосредственной близости к растениям и животным, в достаточно больших концентрациях, может нанести им вред или даже отравить их. Основная причина токсичности заключается в высокой окисляющей способности озона, во многих реакциях с его участием образуются свободные радикалы кислорода.

Одним из естественных источников тропосферного озона являются глобальные атмосферные динамические процессы, когда молекулы озона поступают в тропосферу при обмене воздушными массами со стратосферой. Стоит отметить, что количество озона, возникающего в тропосфере, в результате протекания естественных процессов не так велико, чтобы угрожать здоровью человека или окружающей среде.

В приземном слое не малую роль в образовании озона играют загрязнители воздуха антропогенного происхождения (например, углеводороды и окислы азота). В случае если воздух сильно загрязнен и долгое время стоит жаркая, солнечная погода, возможно образование опасных концентраций озона, в то же время озон – очень чувствительный загрязнитель воздуха, в более загрязненном городском воздухе озон разрушается быстрее, чем на окрестных территориях, сказывается его высокая реакционная способность. Достаточно трудной задачей является мониторинг содержания озона в тропосфере в силу неравномерности его распределения в толще воздуха.

1.3. Методы измерения стратосферного озона

Для получения информации о состоянии озонового слоя используются спутники, озоновые зонды, спектрометры, лидары и пассивные методы измерения.

Озоновый зонд (рисунок 1.5) содержит озоновый сенсор, источник питания, газовую помпу и радиопередатчик. Во время полета воздух с озоном пропускается с помощью помпы через раствор, окисление которого озоном приводит к появлению электрического тока. Величина этого тока пропорциональна концентрации озона. Озоновый зонд может подняться на высоту 30 километров и выше на оболочке, наполненной водородом или гелием.



Рисунок 1.5 – Цифровой радиозонд Vaisala RS92.

Также для оценки озонового слоя используют спектрофотометры Добсона, принцип действия которых основан на дифференциальной спектрофотометрии. Метод дифференциальной спектрофотометрии основан на сравнении уровня поглощения на двух длинах волн - 305нм (поглощение озона) и 325нм (опорная длина волны). В качестве источника света используют ультрафиолетовое излучение Солнца или Луны.

Анализ поглощения ультрафиолетового излучения на используемых длинах волн делает возможной оценку концентрации озона в атмосфере и его пространственного распределения.

Одним из первых инструментов, используемых для измерения ОСО был спектрометр Добсона, изобретенный Гордоном Добсоном в 1924 году. Он представляет из себя двойной монохроматор с прозрачной для ультрафиолетовой радиации оптикой.

Измерение ОСО происходит путём измерения интенсивности УФ-В (315-280 нм) излучения и сравнения ее с интенсивностью УФ-А (315-400 нм) излучения. Смысл этого в том, что если бы в атмосфере не было озона, то интенсивность УФ-А была бы равна УФ-Б, но в действительности это не так и, поэтому, соотношение между УФ-А и УФ-Б можно использовать для определения общего содержания озона в атмосфере. В этом так же заключается слабость этого метода, так как на результаты измерений могут повлиять примеси в атмосфере, способные поглощать радиацию выбранных длин волн. Спектрометр Добсона может определять содержание озона в атмосфере как при прямом свете Солнца, так и при свете Луны, а так же по рассеянному свету неба.

Для измерения содержания озона в атмосфере используются также спектрофотометры Брюэра (рисунок 1.6). Современная модель спектрофотометра Брюэра, МК-III фирмы Kipp&Zonen, обеспечивает почти одновременные наблюдения за содержанием озона и сернистого газа (SO_2) в атмосфере, и за спектром ультрафиолетового излучения. Данный вид спектрометра может работать в широком диапазоне температур.



Рисунок 1.6 – Спектрофотометр Брюэра МК-III (фото из сети интернет)

На наземных озонометрических станциях в Российской Федерации основным прибором для измерений ОСО является озонометр М-124 (рисунок 1.7, 1.8). Для установки прибора должно быть выбрано место, с закрытием горизонта не более 10° , причем не имеет значения установлен ли прибор на земле или крыше здания.

Принцип работы спектрометра М-124 основан на преобразовании потока солнечного излучения в электрический сигнал, пропорциональный спектру плотности энергетической освещенности (СПЭО) в диапазоне длин волн 290 – 400нм. ОСО определяется по соотношению сигналов на линиях поглощения озона атмосферы.



Рисунок 1.7 – Озонометр М-124 в рабочем состоянии. Измерение содержания озона по Солнцу в солнечную погоду (фото взято из интернета)

Спектрометр представляет из себя переносной прибор и состоит из следующих блоков:

- блока приема и передачи сигнала, представленного в виде двух каналов («зенит» и «полусфера») и оптического волокна;
- спектрометрического блока, состоящего из поворотного зеркала и диспергирующего элемента - дифракционной решётки и приемника излучения – ПЗС-линейки (прибор с зарядовой связью);
- блока питания;



Рисунок 1.8 – Измерение содержания озона по зениту в пасмурную погоду (фото взято из интернета)

– процессора, обеспечивающего режимы измерений, сбор и передачу информации на персональный компьютер.

Солнечное излучение, принимаемое каналами «зенит» и «полусфера», поступает на входную щель спектрометра. Далее, с помощью поворотного зеркала излучение направляется на диспергирующий элемент для выделения спектрального диапазона 290–400 нм и далее на ПЗС-линейку. С помощью процессора излучение преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный СПЭО.

Стоит отметить, что М-124 обладает меньшей точностью измерений, чем спектрометры Добсона и Брюэра. Также калибровка используемых на сети фильтровых ознометров проводится с помощью спектрофотометра Добсона №108.

Спутниковые методы измерения общего содержания озона основаны на данных, получаемых с помощью оптической аппаратуры установленной на космических аппаратах дистанционного зондирования. В основном они выводятся на солнечно-синхронные приполярные круговые орбиты. Плоскость такой орбиты отклонена относительно оси вращения Земли. Таким образом наблюдения за состоянием озоносферы проводятся на освещенной части Земли в одно и тоже местное солнечное время. При пассивных дистанционных наблюдениях за атмосферным озоном реализуются два типа геометрии измерений: надирная и на горизонт планеты (касательные трассы, называемые также лимбовыми). В первом типе геометрии уходящее (рассеянное и отраженное) солнечное излучение регистрируется методом обратного рассеяния в вертикальном направлении.

Достоинство надирных измерений состоит в получении непрерывного ряда данных о глобальном поле ОСО с определенной периодичностью. Метод реализуется на КА, выведенных на солнечно-синхронные орбиты.

Методика определения ОСО с помощью спектрофотометра аналогична наземной методике. Общее содержание озона вычисляется из разницы

поглощения отраженного и рассеянного УФ-излучения на двух парах длин волн, выделяемых монохроматором на дифракционной решетке.

Спектрометр TOMS (Total Ozone Mapping System) используется для измерения ОСО и устанавливается на космических аппаратах.

8 июля 2019 года на орбиту был запущен космический аппарат Метеор-М №2, предназначенный для проведения дистанционного зондирования Земли в интересах гидрометеорологии. В состав аппаратуры этого космического аппарата вошел инфракрасный фурье-спектрометр высокого спектрального разрешения ИКФС-2, предназначенный для получения информации о параметрах и составе атмосферы, в том числе и об общем содержании озона.

При высоте орбиты 830 км спектрометр имеет пространственное разрешение 35 км. Прибор работает в спектральном диапазоне $665\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ и со спектральным разрешением $0,5\text{ см}^{-1}$. Технические характеристики ИКФС-2 позволяют получить данные об общем содержании озона с погрешностью не более 5%

Стоит подчеркнуть, что помимо озона спектрометр может предоставить информацию о температуре в тропосфере и нижней стратосфере с погрешностью 1-1,5 К, с вертикальным разрешением до 1 км в нижней тропосфере, профилях влажности в тропосфере с погрешностью 10 %, вертикальным разрешением 1-2 км в нижней тропосфере, о общем содержании в атмосфере малых газовых составляющих (например, CH_4 , N_2O), а также о многих других характеристиках атмосферы.

В состав прибора входят оптико-механический блок (ОМБ) и блок обработки, управления и питания (МЭ). В свою очередь ОМБ состоит из модуля сканера, модуля интерферометра и радиационного холодильника. Модуль сканера направляет осуществляет наведение прибора на выбранную точку, а также содержит эталонный источник инфракрасного излучения для калибровки прибора. В модуле интерферометра происходит непосредственно измерение спектральной яркости объектов на участке, на который наведен

прибор. При этом ОМБ расположен снаружи на надирной поверхности космического аппарата.

МЭ отвечает за управление работой аппарата (в том числе прием и выполнение команд космического аппарата) и обработки данных, полученных прибором, а также запись полученной информации в память космического аппарата. МЭ в свою очередь находится в специальном герметичном контейнере.

Стоит отметить, что одним из недостатков спутниковых наблюдений за ОСО заключается во влиянии облачности на результаты измерений.

2. Исследование изменчивости озонового слоя различного временного масштаба

Для последующего анализа были использованы данные приборов TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) на спутнике Nimbus-7, TOMS на спутнике Earth Probe, OMI (Ozone Mapping Instrument) на спутнике Aura, OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite) на спутнике Suomi NPP, данные взяты с сайта NASA.

Так же для оценки состояния озонового слоя над полярными широтами были использованы карты WOUDC, построенные по результатам наземных наблюдений.

2.1. Изменение ОСО в течение года

Форма годового хода общего содержания озона известна давно и всегда привлекала к себе внимание своим отличием от хода других атмосферных параметров. Тогда как температура, влажность, атмосферное давление и др. на всех высотах следуют, обычно с небольшим отставанием, за ходом солнечной радиации или меняются обратно ей, то количество озона в северном полушарии обычно достигает крутого максимума весной и затем уменьшается до минимума осенью.

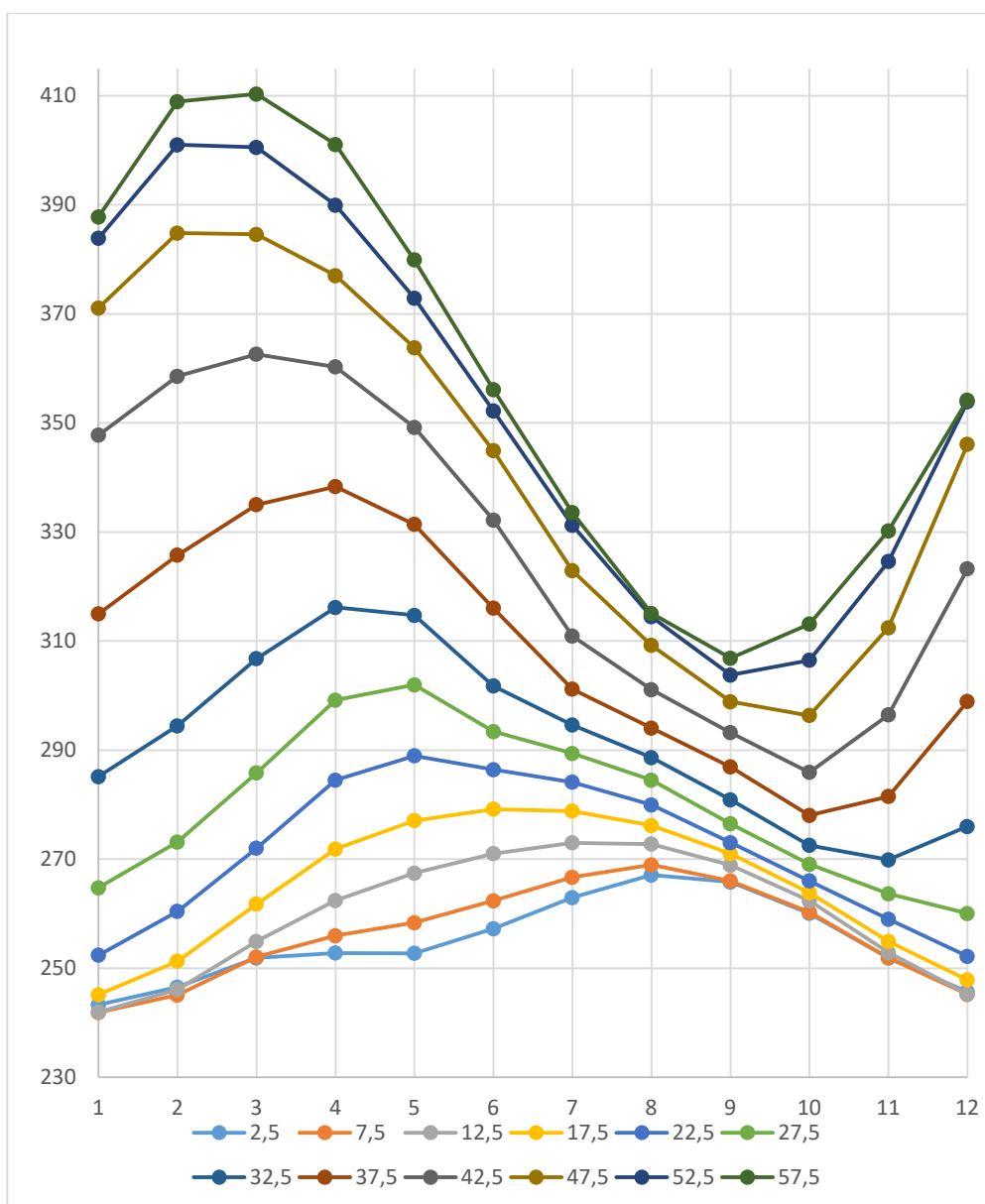


Рисунок 2.1 - Годовой ход по широтам общего содержания озона в атмосфере по данным Suomi NPP OMPS, осредненный за период с 2013 по 2020 годы.

На рисунке 2.1 представлен график годового хода общего содержания озона по широтам в атмосфере по данным Suomi NPP OMPS, осредненный за период с 2013 по 2020 годы. В северном полушарии ход озона довольно прост. В умеренных и полярных широтах максимум наблюдается в конце марта или в начале апреля. Несколько раньше на широте 57,5° и позднее в околополярной зоне и на широтах 37,5÷57,5° с.ш.

Минимум общего содержания озона наблюдается в области севернее $32,5^\circ$ с.ш. обычно в октябре, на широте $52,5^\circ$ с.ш и $57,5^\circ$ с.ш – в сентябре. Годовой минимум в широтах от 35° до 60° с.ш. находится в пределах 278-306 е.Д. Иначе говоря, в период минимума озон распределен в этом поясе почти равномерно. Здесь слой озона расположен сравнительно низко ($20\div 25$ км), он очень изменчив от сезона к сезону, это хорошо видно на рис. 2.1.

Около $37,5^\circ$ с.ш. форма годового хода озона меняется. К югу от этой широты максимумы ОСО резко уменьшаются и запаздывают, также немного снижаются минимумы. Амплитуда ОСО здесь резко убывает. В тропической зоне горизонтальные различия озона не велики и градиенты его слабы. Различие между максимумом и минимумом здесь всего 20-40 е.Д., что можно объяснить постоянством продолжительности светового дня в течение года. Вблизи экватора, но не совпадая с ним, проходит линия минимального количества озона. Ее расположение обусловлено тем, что из-за интенсивности солнечной энергии в этой области озон хорошо генерируется, но и быстро разрушается.

Амплитуда годового хода озона велика в полярной зоне, где она достигает почти 200 е.Д. Отсюда амплитуда уменьшается к умеренным и субтропическим широтам, сначала медленно, потом быстрее, почти параллельно убыванию амплитуды годового хода солнечной радиации.

Наибольшая убыль количества озона в полярных областях происходит в летний период.

Осредненный на широтах $2,5-57,5$. годовой ход общего содержания озона в атмосфере представлен на рисунке 2.2. На рисунке видно, что ОСО в среднем на полушарии максимально в апреле и минимально в октябре. Так же в пределах широт $2,5-57,5$ амплитуда общего содержания озона составляет 40 е.Д.

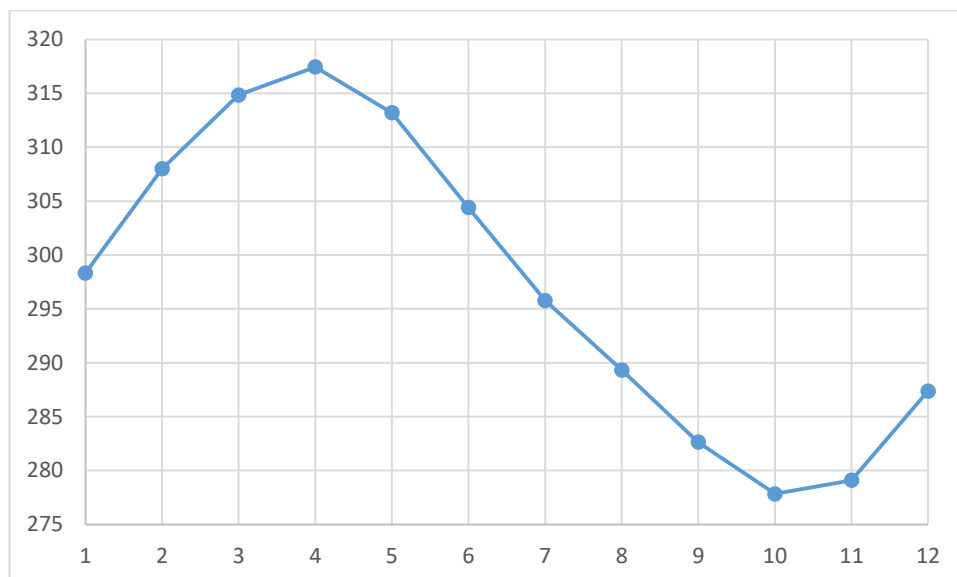


Рисунок 2.2 – Годовой ход в пределах широт 2,5-57,5 общего содержания озона в атмосфере по данным Suomi NPP OMPS, за период с 2013 по 2020 годы.

2.2. Сравнение среднегодовых значений ОСО

Как уже упоминалось выше, проблема истончения озонового слоя заинтересовала широкую общественность. В связи с этим был принят ряд мер по охране озонового слоя Земли, в числе которых значится контроль над производством и выбросами озоноразрушающих веществ.

В целях понимания эффективности принятых мер возникает необходимость в сравнении данных об общем содержании озона за разные годы наблюдений.

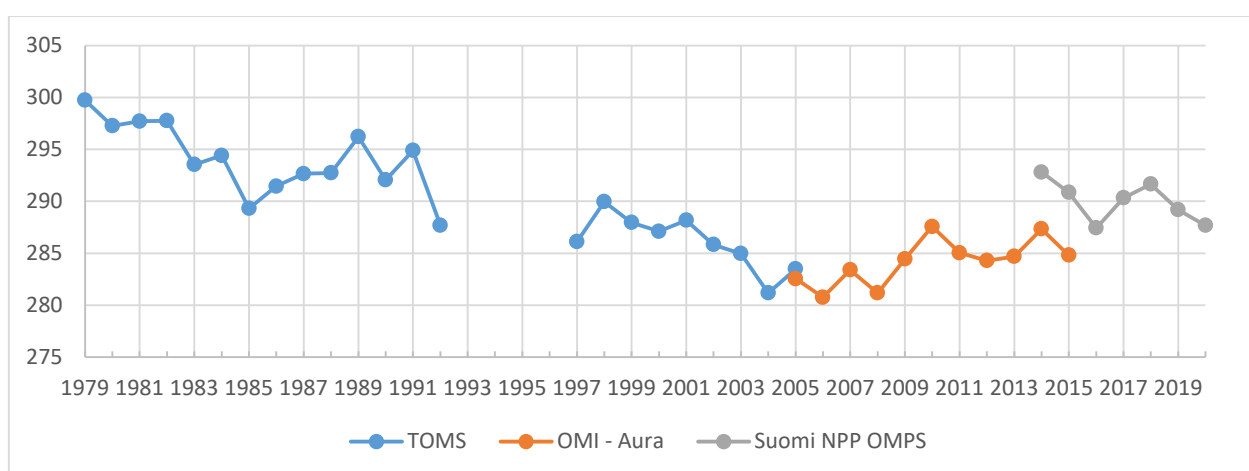


Рисунок 2.3 – Среднегодовые значения ОСО с 1979 по 1992 и 1997 и 2005 годы по данным TOMS, с 2005 по 2015 годы по данным и с 2014 по 2020 годы по данным Suomi NPP OMPS

График, приведённый на рисунке 2.3 показывает, как менялось среднегодовое общее содержание озона с 1979 по 2019 годы. В различные временные отрезки использовались разные спутниковые приборы и значения с этих приборов могут немного отличаться друг от друга в связи с особенностями технических характеристик каждого прибора, тем не менее на данном графике хорошо читается линия тренда.

В периоде с 1979 по 2005 год, не смотря на отсутствие данных с 1992 по 1997 год четко видно падение ОСО в атмосфере. С 2006 года падение ОСО прекратилось, и даже, в общем, наблюдается небольшой рост общего

содержания озона в атмосфере. Таким образом, не смотря на то что общее содержание озона до сих пор так и не вернулось к значениям первой половины 80х годов двадцатого века, выраженное падение общего содержания озона в атмосфере удалось остановить, благодаря международному сотрудничеству в сфере охраны озонового слоя.

Для оценки роли Монреальского протокола в уменьшении темпов истончения озонового слоя стоит так же рассмотреть изменение концентраций озоноразрушающих веществ в атмосфере. Для более удобной оценки содержания озоноразрушающих веществ в атмосфере в NOAA был разработан специальный индекс озоноразрушающих газов ODGI (Ozone Depleting Gas Index).

Этот индекс получен на основе наблюдений NOAA на поверхности Земли за наиболее распространенными долгоживущими хлор- и бромсодержащими химическими веществами, производство и потребление которых регулируется Монреальским протоколом (15 отдельных химических веществ). Он определяется как 100 на пике содержания галогенов, разрушающих озоновый слой, как определено наблюдениями NOAA, и ноль для уровня 1980 года, что соответствует тому, когда можно ожидать восстановления озонового слоя на основе наблюдений в прошлом.

Рассчитываются два разных индекса: один относится к озоновому слою над Антарктидой (ODGI-A), а другой относится к озоновому слою в средних широтах (ODGI-ML). Хотя оба индекса получены на основе измерений NOAA содержания галоидоуглеродов на поверхности Земли, необходимы отдельные индексы для этих различных регионов стратосферы, чтобы учесть уникальный характер стратосферы полярных широт по сравнению со стратосферой средних широт в обоих полушариях. Предполагается, что значения индекса для арктической стратосферы лежат между ODGI-A и ODGI-ML в любой год.

При расчете ODGI 2021 года учитываются скорости фотохимического разложения ОРВ, характерные для интересующего стратосферного региона. Эти скорости зависят от продолжительности изоляции воздуха в стратосфере от тропосферы. Кроме того, считается, что эффективность неорганического брома в разрушении озона по сравнению с хлором в 60-65 раз выше. Когда эти факторы рассматриваются в сочетании с измеренным глобальным средним содержанием в нижней тропосфере, выводится величина, называемая эквивалентным эффективным стратосферным хлором EESC (Equivalent Effective Stratospheric Chlorine), ODGI основывается на этом показателе. Как и в случае с ODGI, EESC рассчитывается для стратосферы средних широт (EESC-ML) и Антарктики (EESC-A) отдельно. Соответственно ODGI в стратосфере Антарктики (ODGI-A) выводится из значений EESC в стратосфере Антарктики, а ODGI в стратосфере средних широт (ODGI-ML) выводится из значений EESC в средних широтах. - широтная стратосфера.

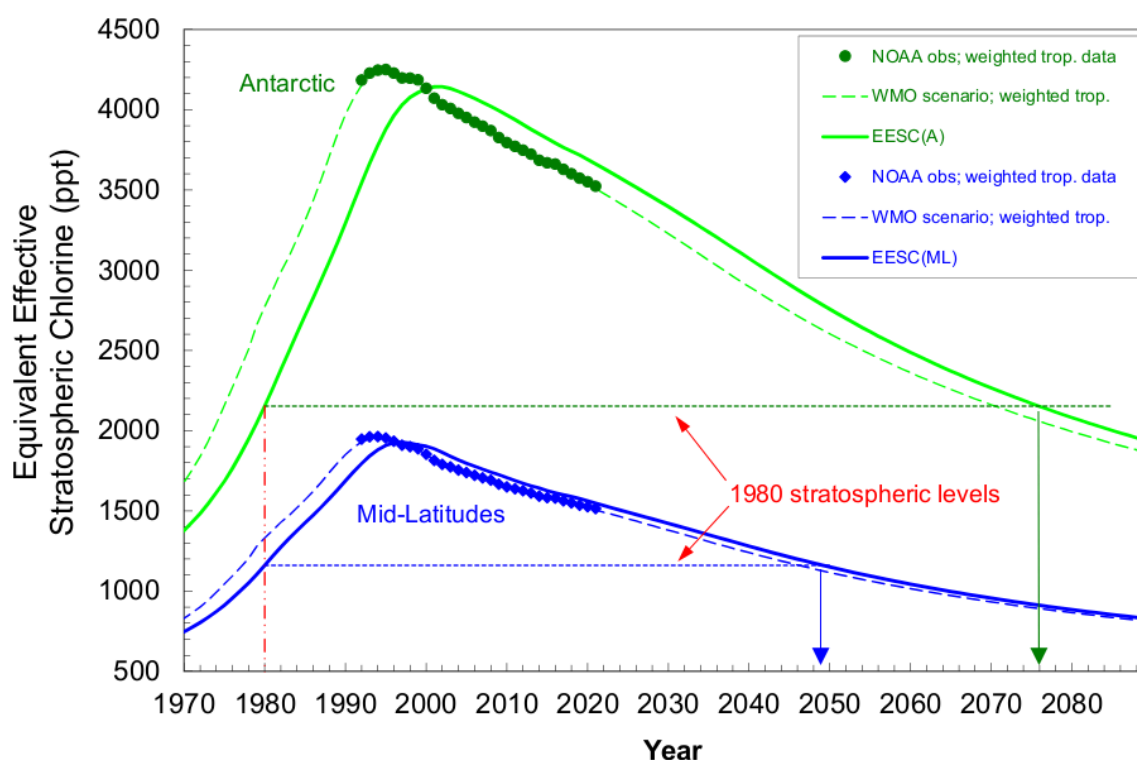


Рисунок 2.4 - Прошлые и прогнозируемые будущие изменения концентрации реактивных галогенов в атмосфере. Прошлые концентрации получены из

измерений NOAA как хлор-, так и бромсодержащих химических веществ; «Сценарии ВМО» взяты из Оценки озона ВМО/ЮНЕП 2018 г., которые привязаны к наблюдениям NOAA в прошлом и в будущем предполагают полное соблюдение контроля над производством и потреблением ОРВ в полностью пересмотренном и дополненном Монреальском протоколе. Измеренные тропосферные изменения обозначены пунктирными кривыми и точками, а предполагаемые стратосферные изменения обозначены сплошными кривыми. Оценки даны для разных регионов: стратосферы средних широт и стратосферы Антарктиды. Стрелки, направленные вниз, представляют предполагаемые даты, когда концентрации стратосферного галогена вернутся к эталонным уровням, существовавшим в 1980 году. (<https://gml.noaa.gov/odgi/>)

Воздух, достигающий антарктической стратосферы весной, изолирован от тропосферы в среднем на 5–6 лет, поэтому почти все галоидоуглеводороды в этом воздухе деградировали до неорганических форм, которые являются потенциальными озоноразрушающими агентами. В результате чего значения EESC выше над Антарктидой. Кроме того, прогресс в снижении значений EESC-A до значений 1980 г. был более медленным по сравнению с EESC-ML в средних широтах, поскольку самые последние тропосферные изменения еще не достигли стратосферы Антарктики. Антарктические изменения в EESC-A также задерживаются из-за процессов перемешивания.

Концентрация реактивного галогена в стратосфере средних широт (EESC-ML) обычно меньше, чем в стратосфере Антарктики, потому что у галоидоуглеводородов было меньше времени для разложения высокоэнергетическим солнечным излучением в более молодой стратосфере средних широт (средний возраст стратосферного воздуха средних широт составляет ~3 года). Кроме того, значения EESC-ML относительно снизились

ближе к уровням 1980 года, главным образом потому, что они более точно отслеживают тропосферные тренды, учитывая более короткое время переноса воздуха из тропосферы в стратосферу средних широт. Другой фактор, способствующий большему относительному уменьшению EESC-ML, возникает из-за того, что уровни реактивных галогенов в средних широтах более чувствительны к изменениям, наблюдаемым для короткоживущих химических веществ, которые довольно быстро уменьшались в нижних слоях атмосферы в течение последних двух десятилетий (например, CH_3CCl_3 , CH_3Br).

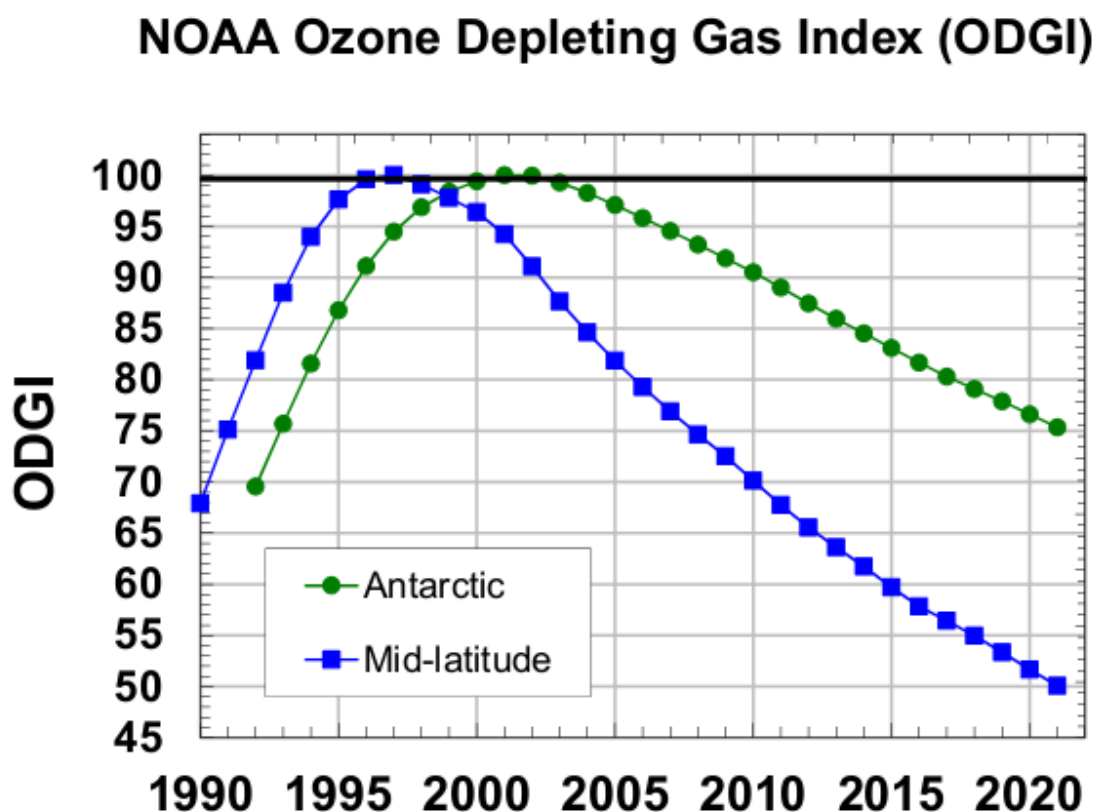


Рисунок 2.5 - Индекс озоноразрушающих газов (ODGI) в зависимости от времени, рассчитанный для Антарктики и стратосферы средних широт. (<https://gml.noaa.gov/odgi/>)

Бромид метила и хлористый метил (CH_3Br , CH_3Cl) являются уникальными среди озоноразрушающих газов, поскольку они имеют значительные природные источники. Несмотря на крупный природный источник CH_3Br , его концентрация в атмосфере снизилась после 1998 года, когда, согласно сообщениям, общее промышленное производство человеком сократилось из-за ограничений Монреальского протокола. Производство для контролируемого распространения было практически прекращено к 2014 году, и с тех пор глобальная концентрация CH_3Br существенно не изменилась, хотя наблюдаются годовые колебания. Производство для исключенных видов использования продолжается, но за последнее десятилетие не произошло заметных изменений.

Хотя Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой, считается успешным и может стать образцом для будущих усилий по сдерживанию изменения климата, о восстановлении озонового слоя говорить преждевременно. Полное восстановление ожидается только при устойчивом снижении содержания хлора и брома в атмосфере в последующие годы и дальнейшем соблюдении ограничений на производство и потребление, изложенных в Протоколе. Увеличение выбросов грозит задержкой восстановления озонового слоя. Восстановление озонового слоя ожидается по мере приближения ODGI к нулю, хотя на сроки полного восстановления озонового слоя будут влиять другие химические и физические факторы, связанные с изменением климата и продолжающимися антропогенными выбросами долгоживущих парниковых газов и их влиянием на атмосферную динамику.

Также в ODGI не учитываются вклады короткоживущих галогенированных химических веществ, не регулируемых Монреальским протоколом. Глобальные концентрации некоторых из этих химических веществ, особенно дихлорметана, в последние годы существенно возросли. В настоящее время их вклад в атмосферный хлор составляет примерно одну треть от ГХФУ.

2.3. Анализ годовой изменчивости общего содержания озона над северным географическим полюсом.

В связи с ограниченностью представленных выше спутниковых данных, состояние озонового слоя в полярных широтах стоит рассматривать, опираясь на наземные данные. По данным наземных наблюдений WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre) строит карты распределения озона по всему земному шару. Для оценки влияния фазы КДК на распределение озона в атмосфере полярных широт были использованы данные о зональном ветре со станции, располагающейся в Сингапуре (рис 2.6).

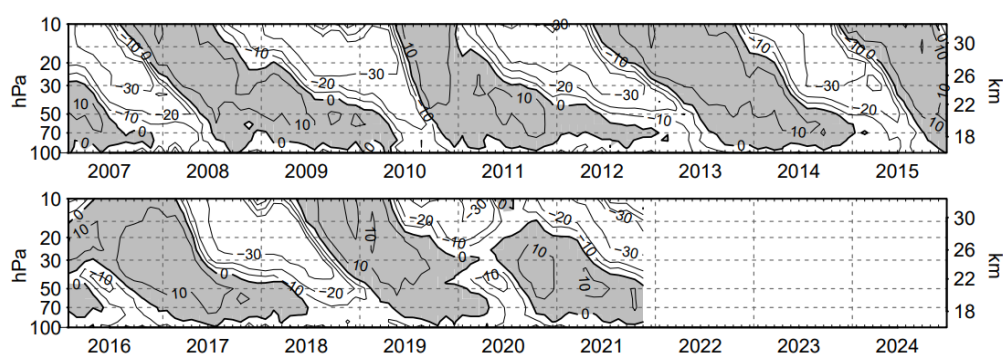


Рисунок 2.6 - Среднемесячные значения зонального ветра (м/с) по данным экваториальной станции в Сингапуре 1°N/104°E. Изоплеты проведены через каждые 10 м/с, западные ветры закрашены серым. (<https://www.geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/qbo/index.html>)

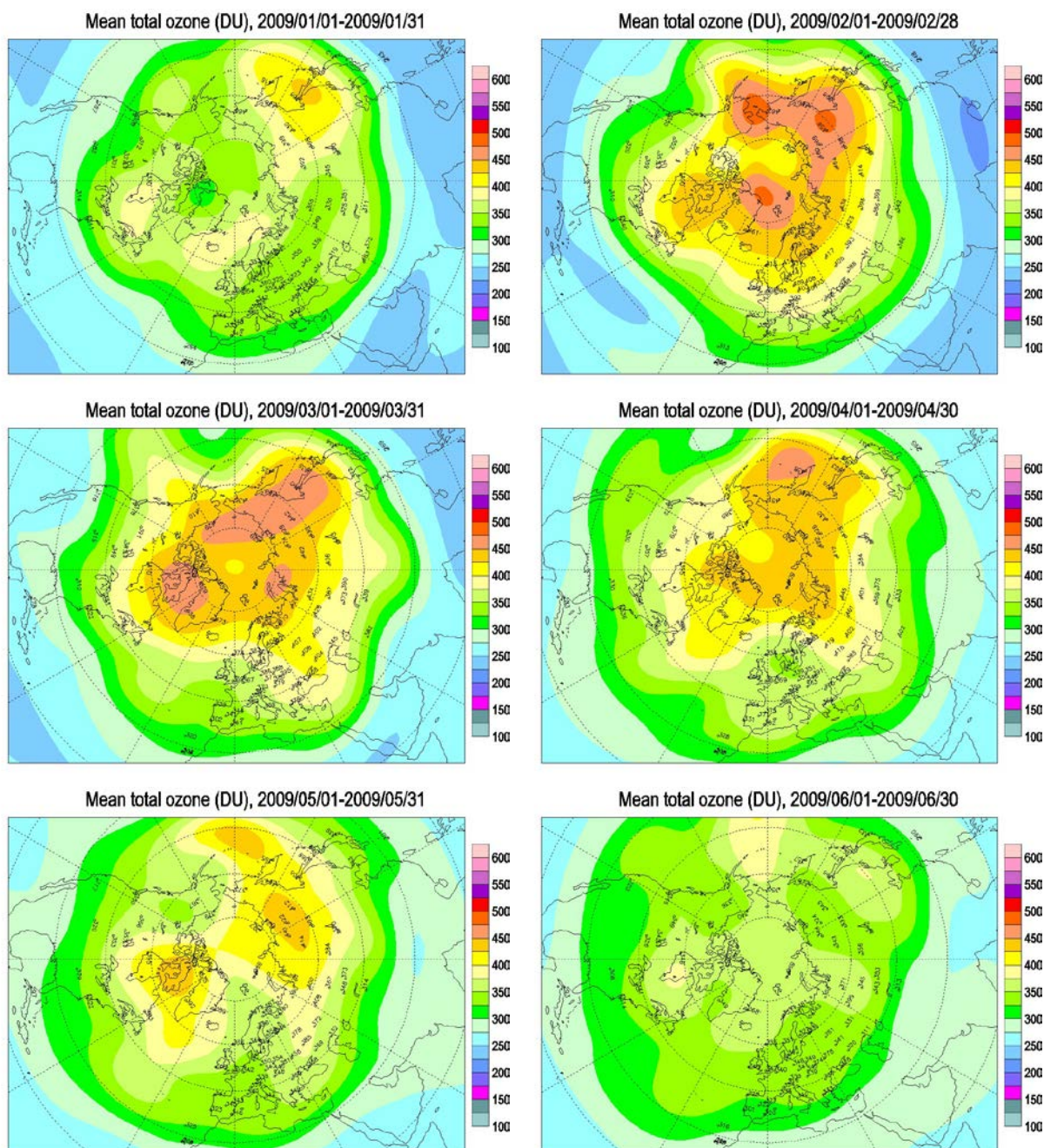


Рисунок 2.7 – Распределение озона над северными полярными широтами в первой половине 2009 года.

В первой половине 2009 года наибольшие в этом году средние значения общего содержания озона (более 450 ед.Д) наблюдались в период с января по апрель. Причем в январе 2009, согласно [15] наблюдалось большое внезапное стратосферное потепление и западная фаза квазидвухлетнего колебания. В течение года фаза КДК была западной.

Во второй половине года ОСО убывает и в сентябре зона со значениями выше 300 ед.Д распадается, над полюсом формируется область с общим содержанием озона менее 270 ед.Д. В ноябре эта область сдвинулась к Мурманской, Архангельской областями и части Ненецкого автономного округа, а в декабре полностью исчезла.

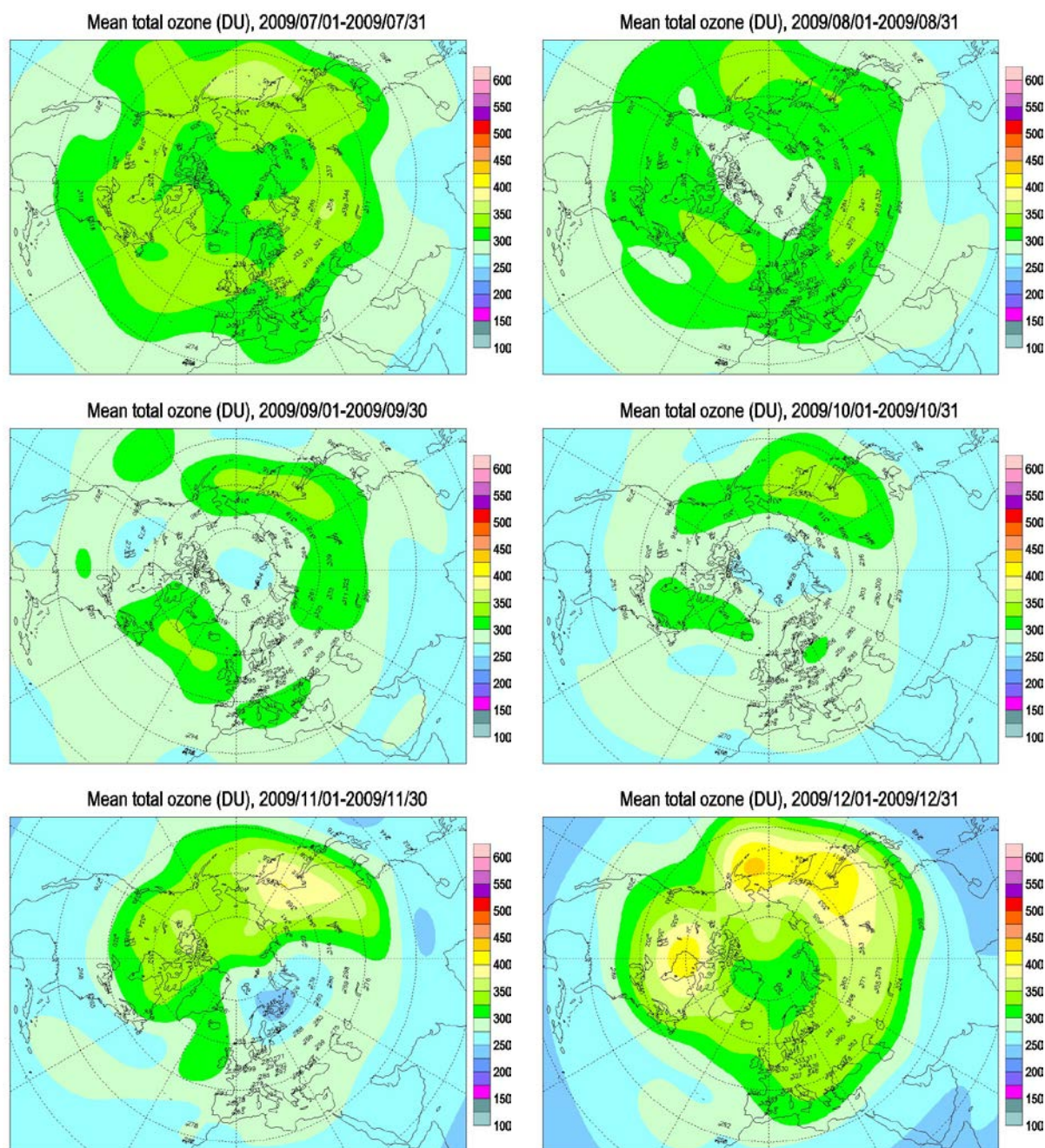


Рисунок 2.8 – Распределение озона над северными полярными широтами во второй половине 2009 года.

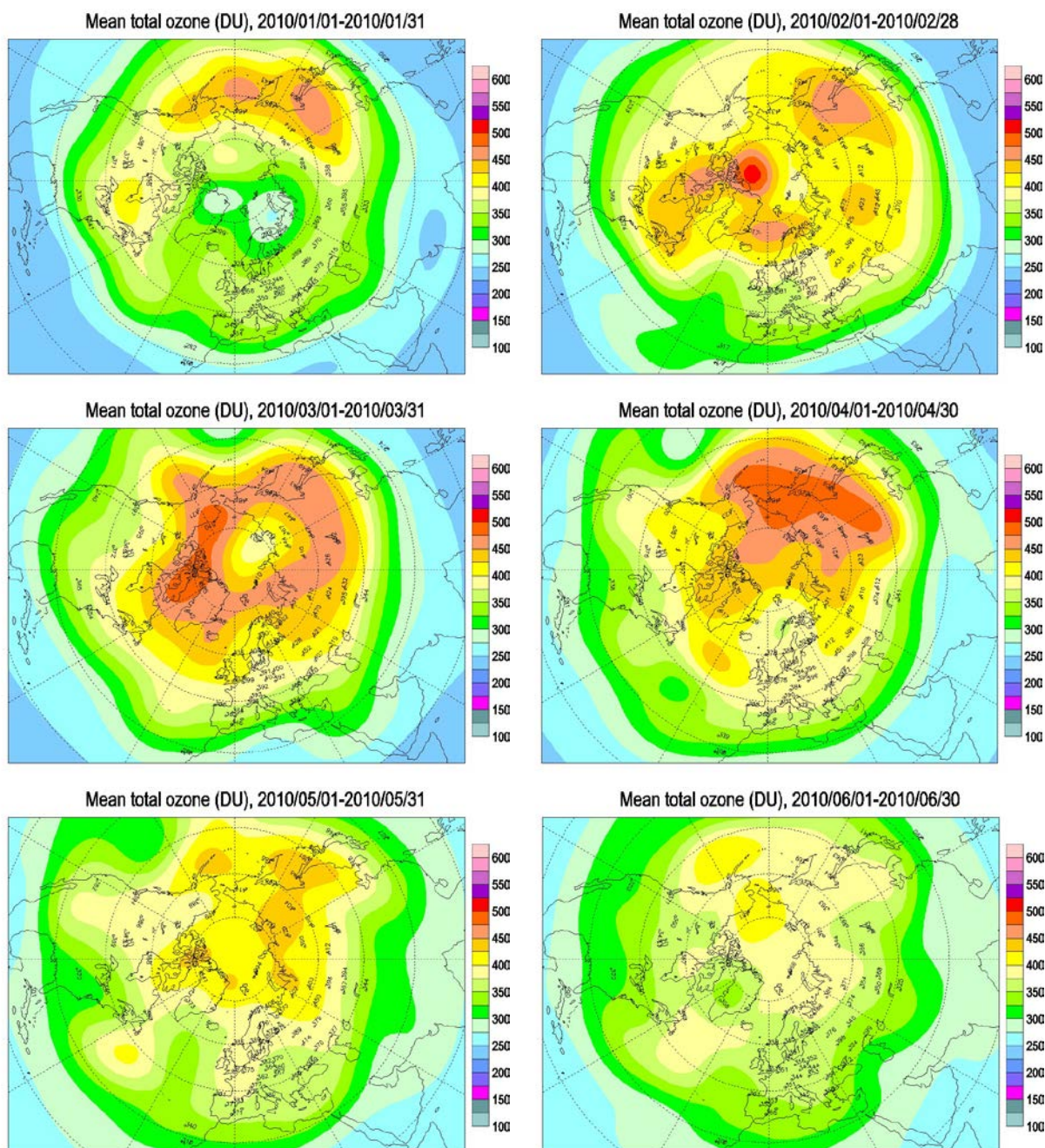


Рисунок 2.9 – Распределение озона над северными полярными широтами в первой половине 2010 года.

В январе 2010 года над полюсом наблюдалась небольшая область значений ОСО менее 300 ед.Д., но одновременно с этим наблюдались и области со значениями более 450 ед.Д. В феврале максимальные концентрации ОСО достигали 500 ед.Д и более, а так же, согласно [15], в первой декаде февраля и третьей декаде марта наблюдались большие внезапные стратосферные потепления. Во время внезапного стратосферного

потепления в феврале фаза КДК была переходная с западной на восточную, а в марте восточная. Примерно в конце лета фаза КДК сменилась с восточной на западную. В этом полугодии средние значения ОСО более 450 ед.Д. наблюдались первые 4 месяца.

Во второй половине 2010 года общее содержание озона уменьшалось и в ноябре, как и в прошлом году, над частью Мурманской области и Ненецкого автономного округа появилась область значений ОСО менее 270 ед.Д.

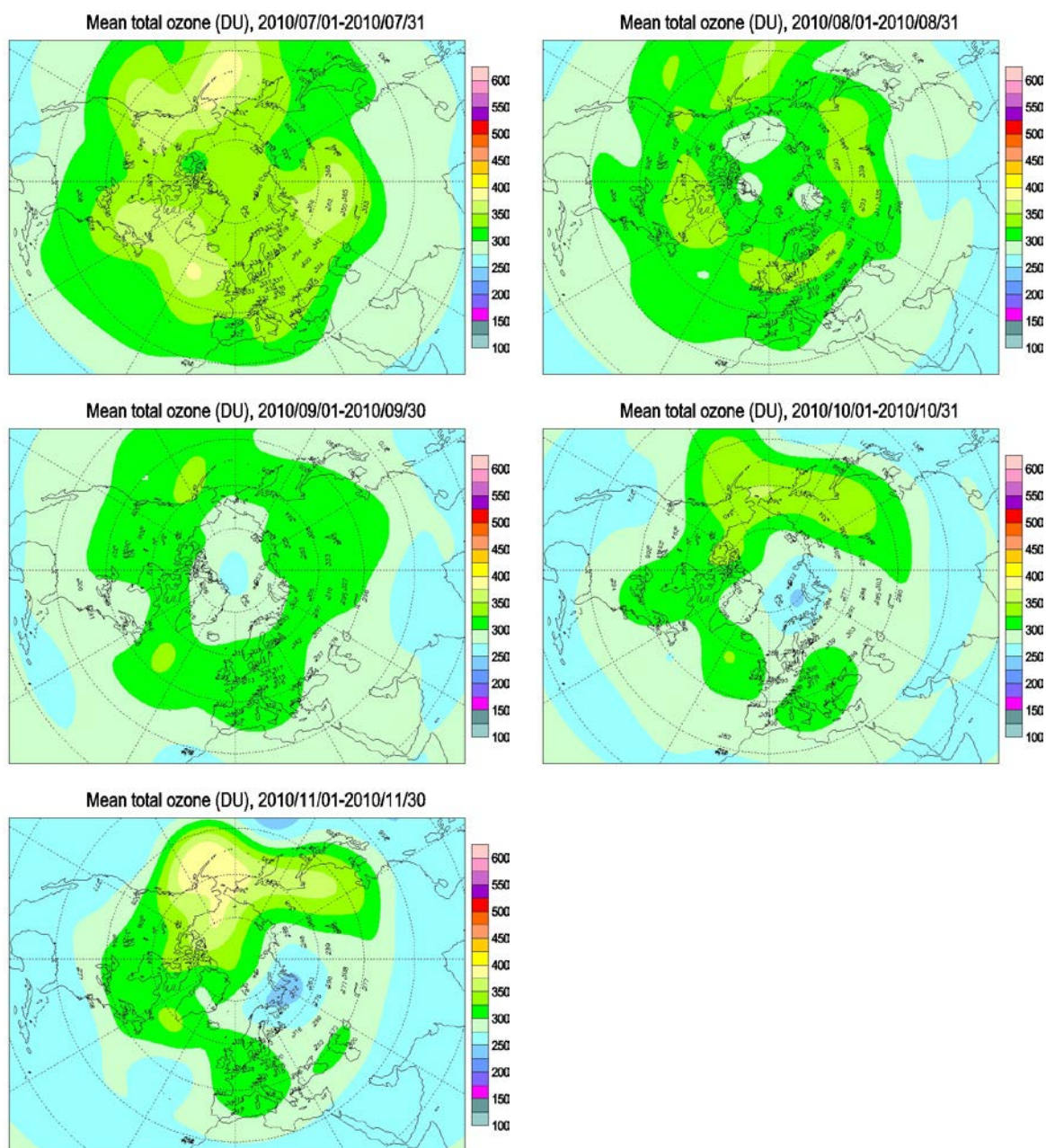


Рисунок 2.10 – Распределение озона над северными полярными широтами во второй половине 2010 года.

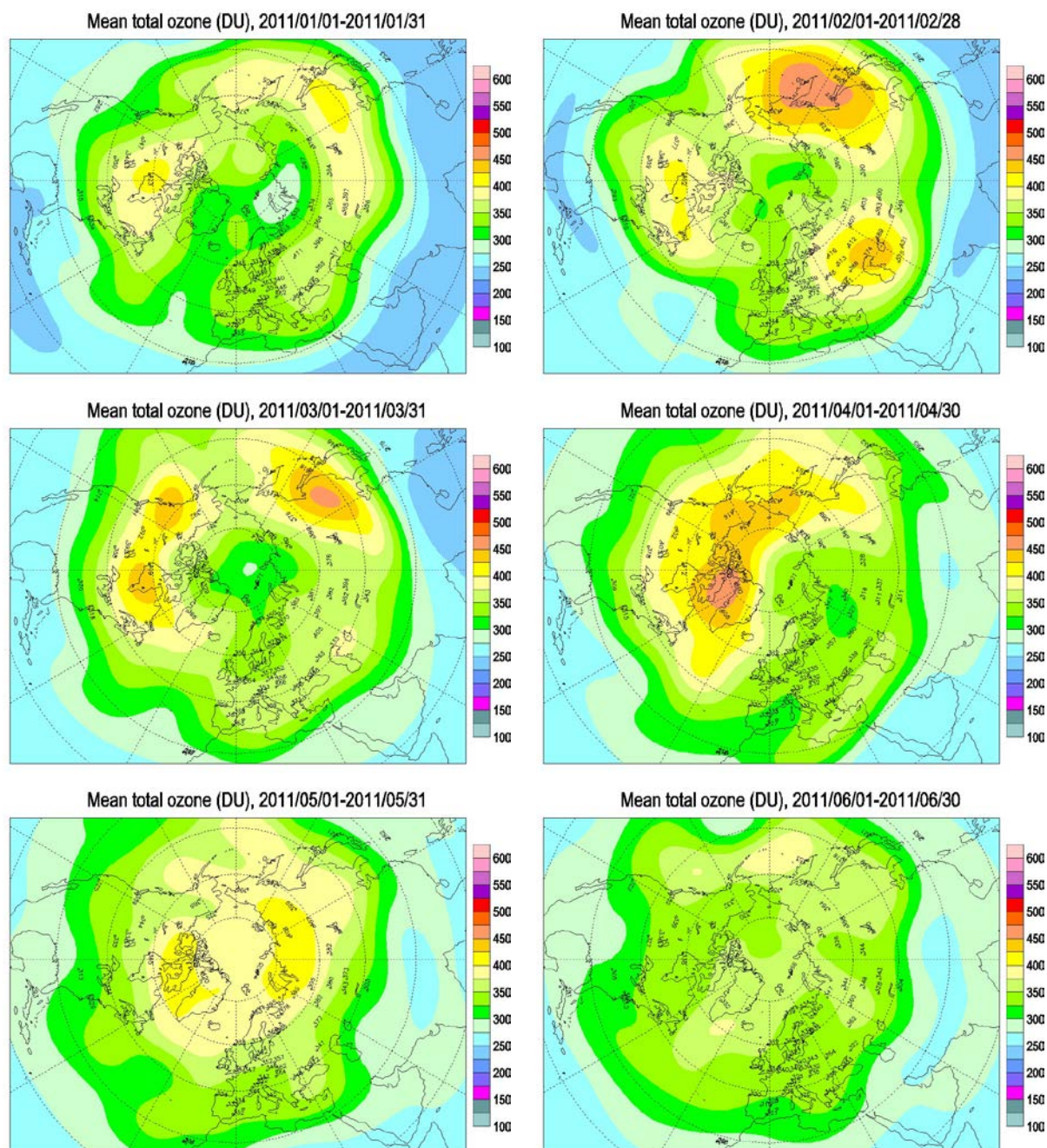


Рисунок 2.11 – Распределение озона над северными полярными широтами в первой половине 2011 года.

По данным из [15] в конце января 2011 года наблюдалось малое внезапное стратосферное потепление и западная фаза квазидвухлетнего колебания в течение всего года. Максимальные средние значения ОСО в январе не превышали 450 ед.Д. Значения 450 ед.Д наблюдались в период с февраля по апрель, то есть 3 месяца, а не 4, как в прошлые годы.

Минимальные средние значения (менее 270) наблюдались не в ноябре, как ранее, а в октябре. Географически минимум расположен так же в районе Мурманской области и Ненецкого автономного округа. Рост общего содержания озона в этом году наблюдался с ноября.

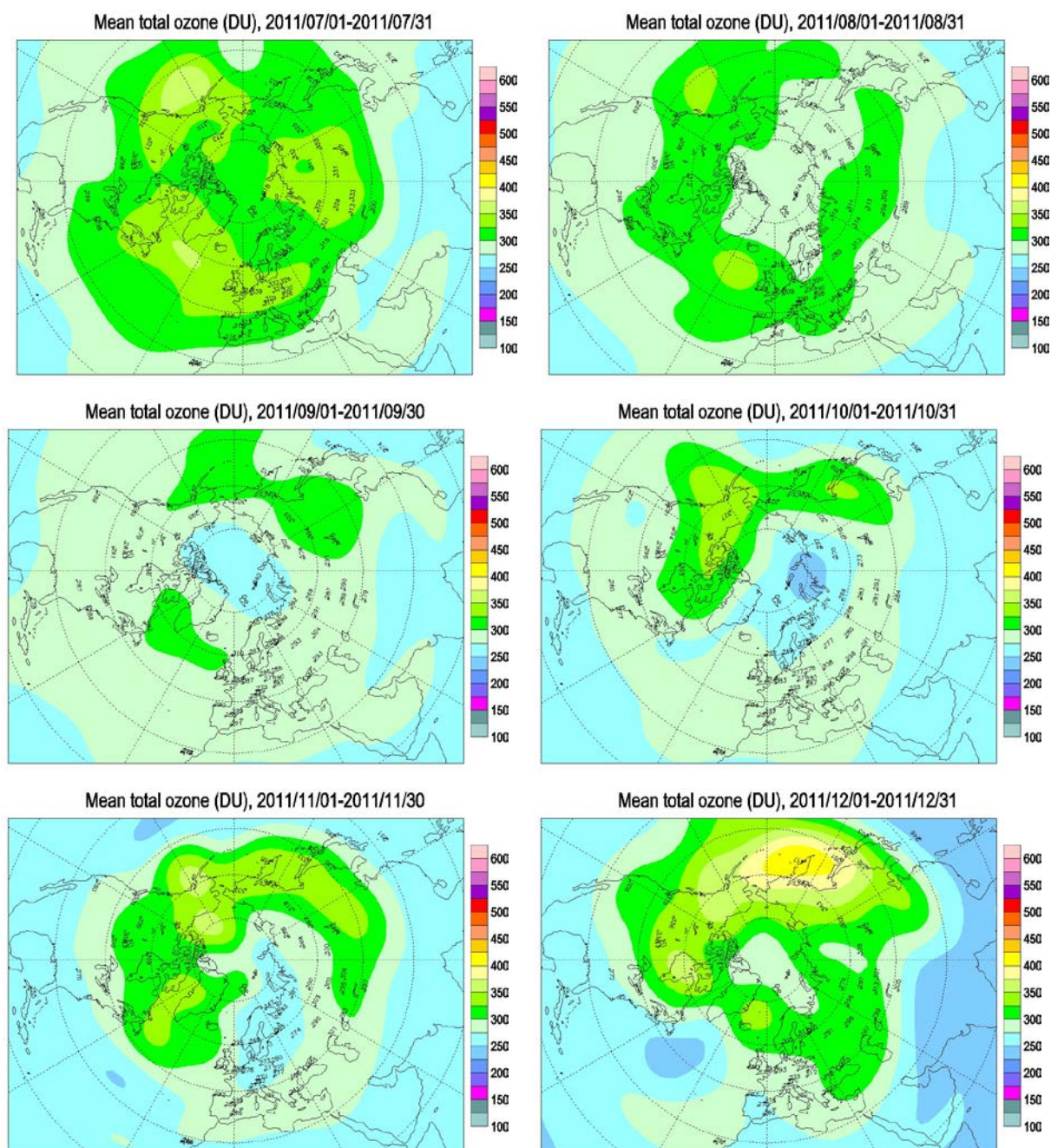


Рисунок 2.7 – Распределение озона над северными полярными широтами во второй половине 2011 года.

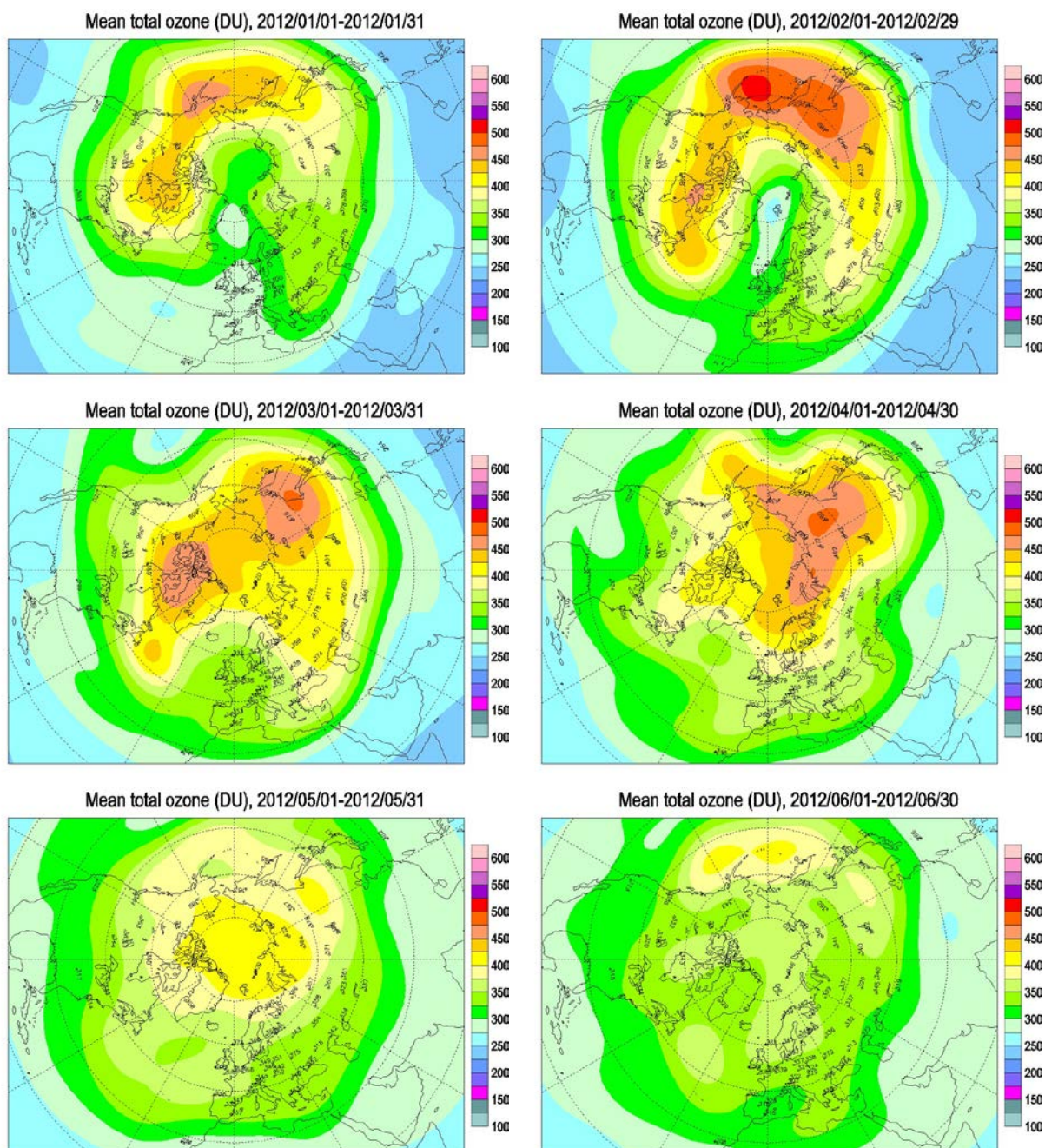


Рисунок 2.12 – Распределение озона над северными полярными широтами в первой половине 2012 года.

В феврале 2012 максимальные средние значения ОСО достигали значений более 480 ед.Д. В это время наблюдался переходная фаза КДК с западной на восточную и весь год фаза оставалась восточной. Подобная картина видна и в 2010, высокие максимальные средние значения ОСО в сочетании с переходом КДК с западной фазы на восточную. Так же как в

прошлые годы над Мурманской областью и Ненецким автономным округом в октябре – ноябре наблюдались средние значения ОСО менее 270 ед.Д.

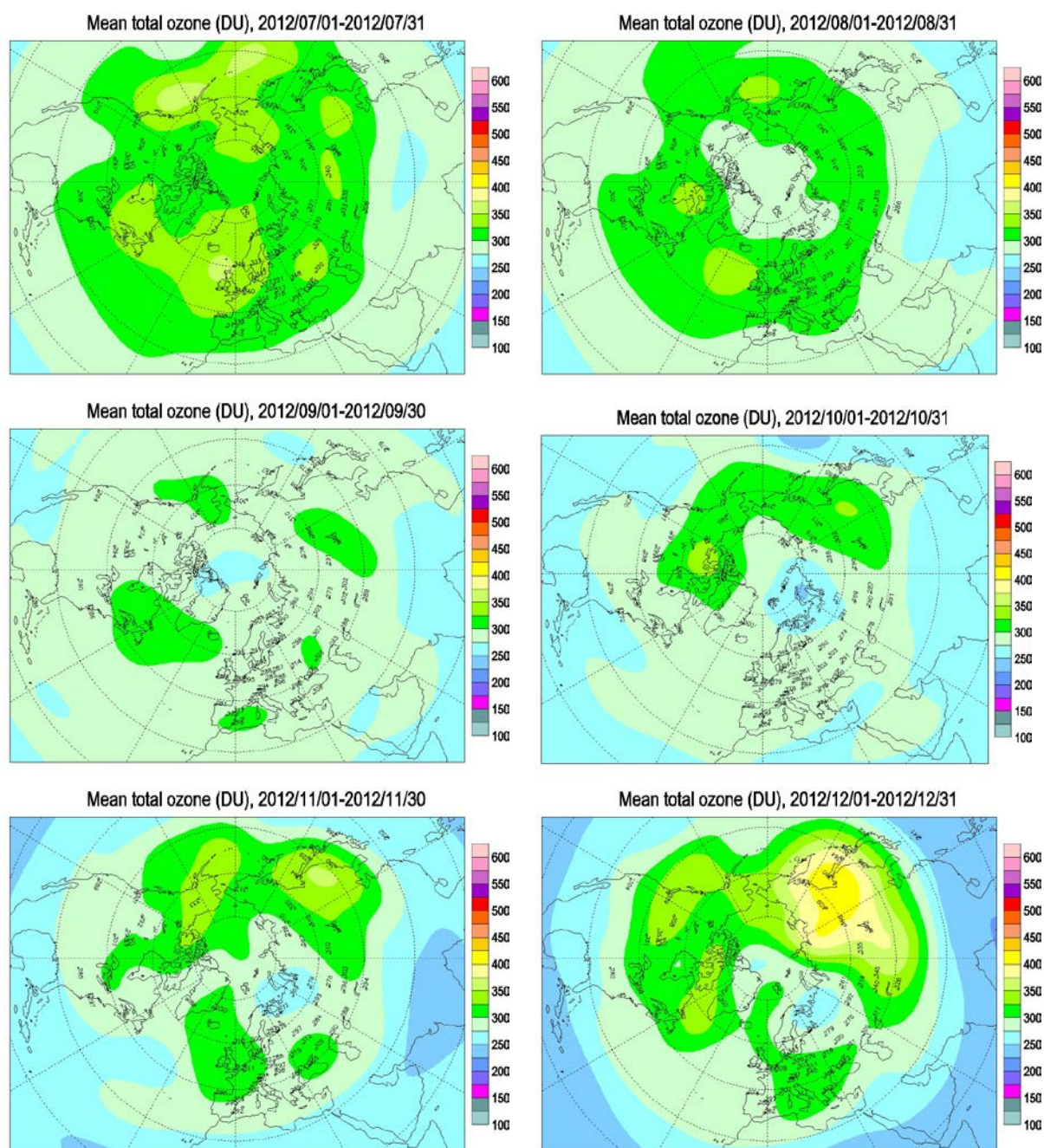


Рисунок 2.13 – Распределение озона над северными полярными широтами во второй половине 2013 года.

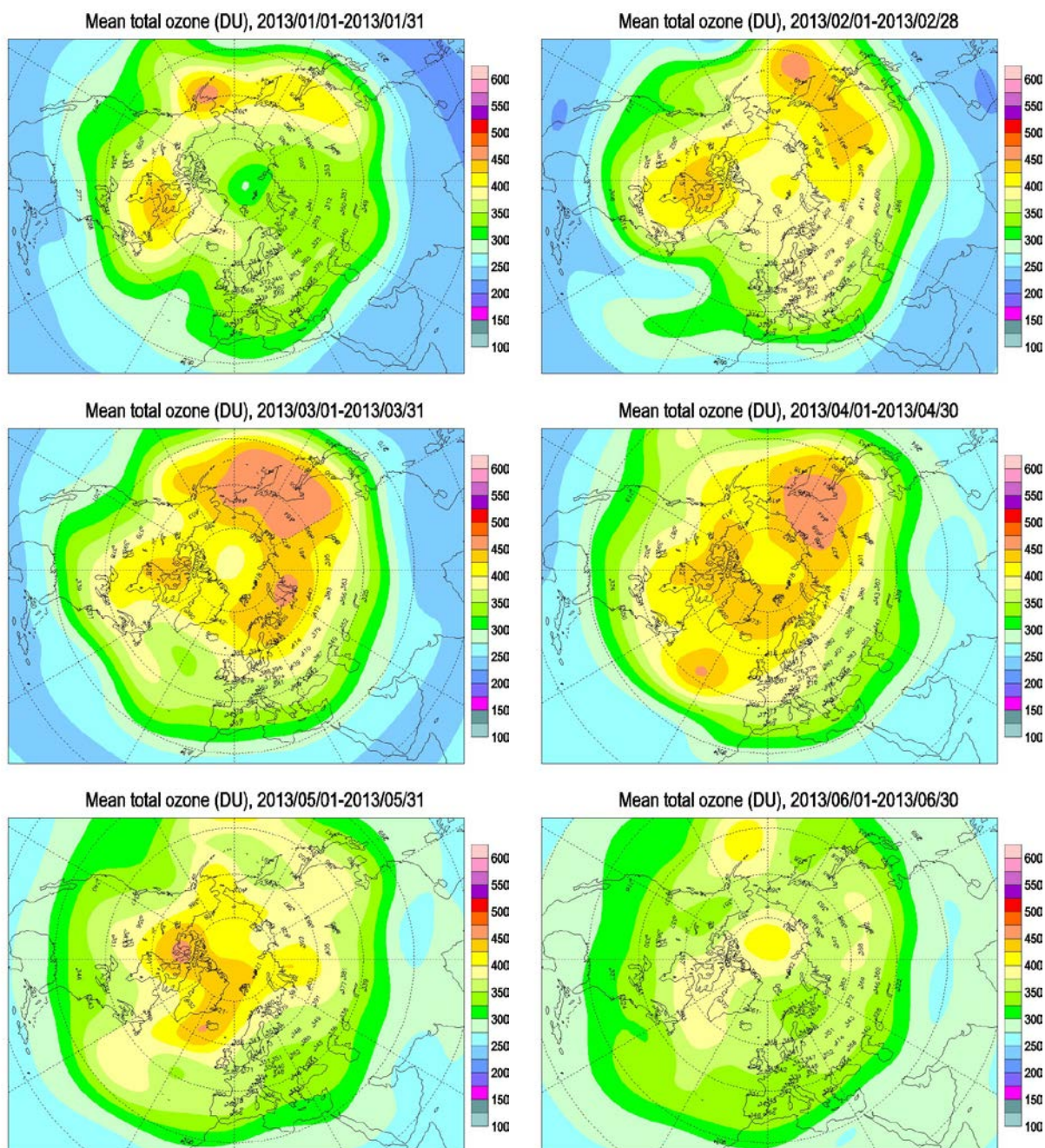


Рисунок 2.14 – Распределение озона над северными полярными широтами в первой половине 2013 года.

Первая половина 2013 года мало чем отличалась от предыдущих годов, за исключением того, что согласно [15] наблюдалось большое ВСП, фаза КДК в начале года была восточная, примерно в конце весны фаза сменилась на западную. В ноябре этого года над Аляской среднее значение ОСО было 612 ед.Д, чего в прошлые годы не наблюдалось. В декабре над этим же

регионом ОСО ниже, чем в округе. Так же в этом году не наблюдалось минимума в районе Белого моря и прибрежных территорий.

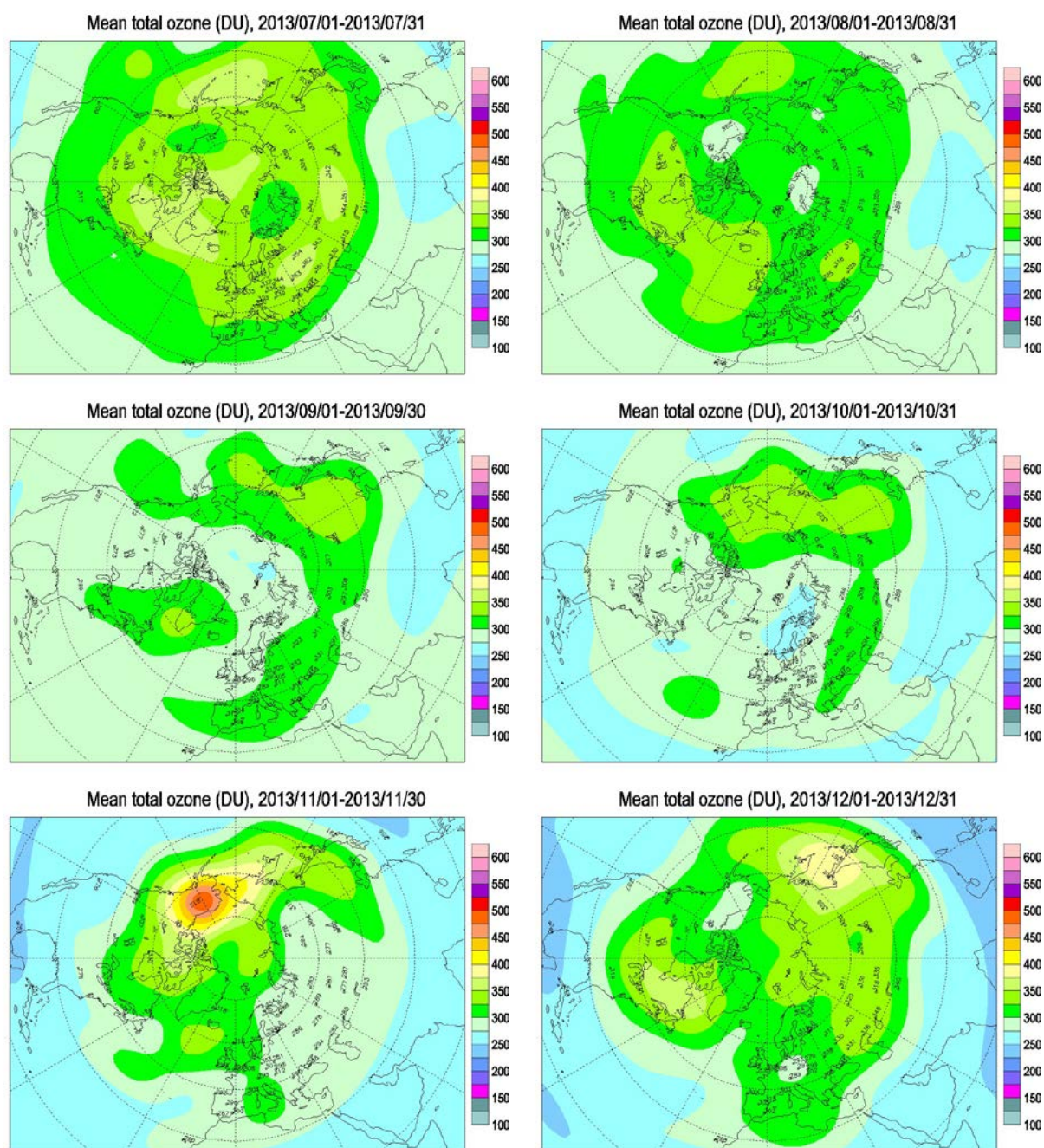


Рисунок 2.15 – Распределение озона над северными полярными широтами во второй половине 2013 года.

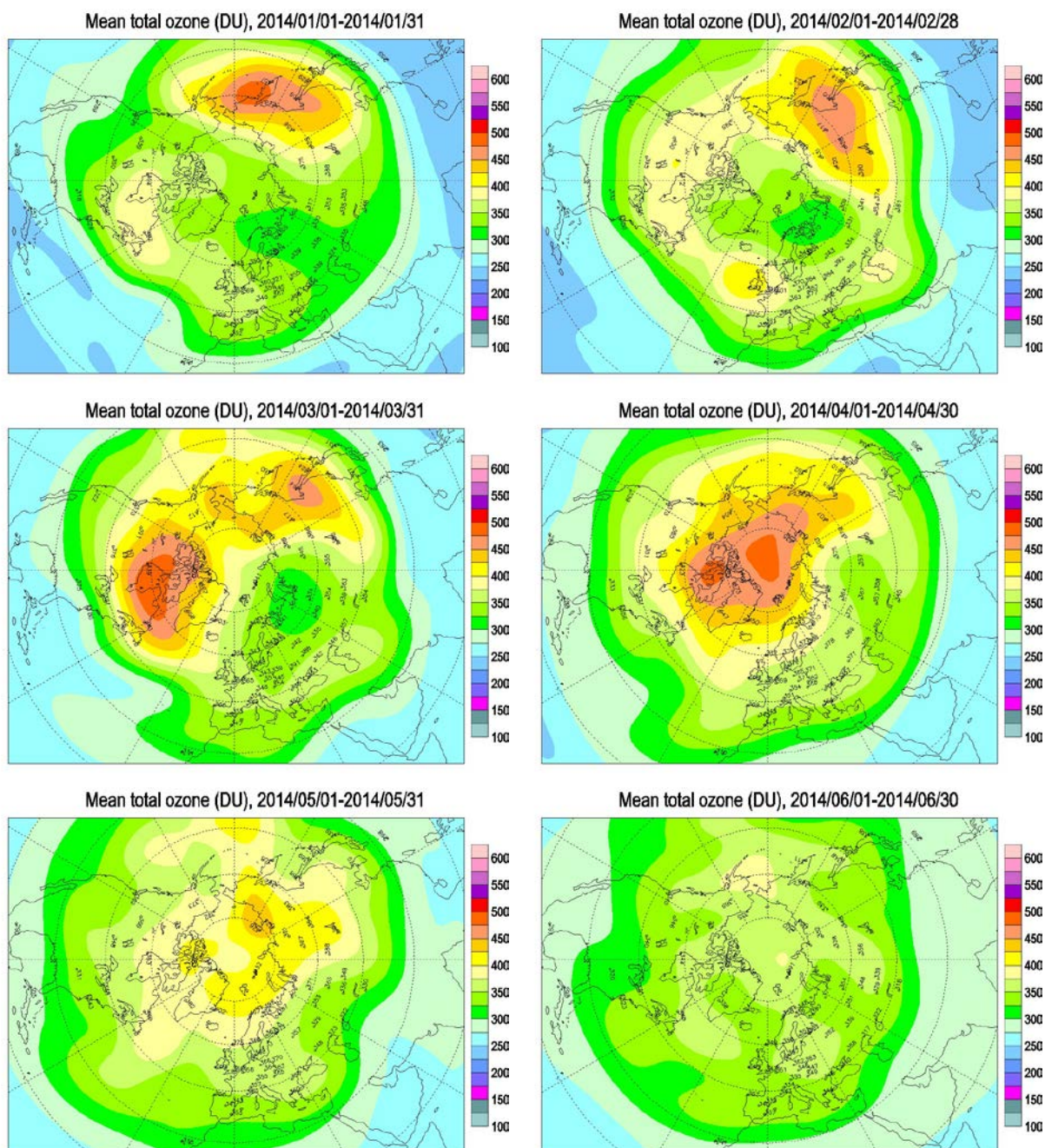


Рисунок 2.16 – Распределение озона над северными полярными широтами в первой половине 2014 года.

В 2014 году в первом полугодии максимальные средние значения ОСО были в пределах 450-470 ед.Д. Наблюдались два малых ВСП в начале февраля и в начале марта [15]. Фаза КДК большую часть года была западная, в декабре - восточная. Во второй половине года, как в предыдущие рассмотренные годы, кроме 2013, наблюдался минимум над Мурманской областью.

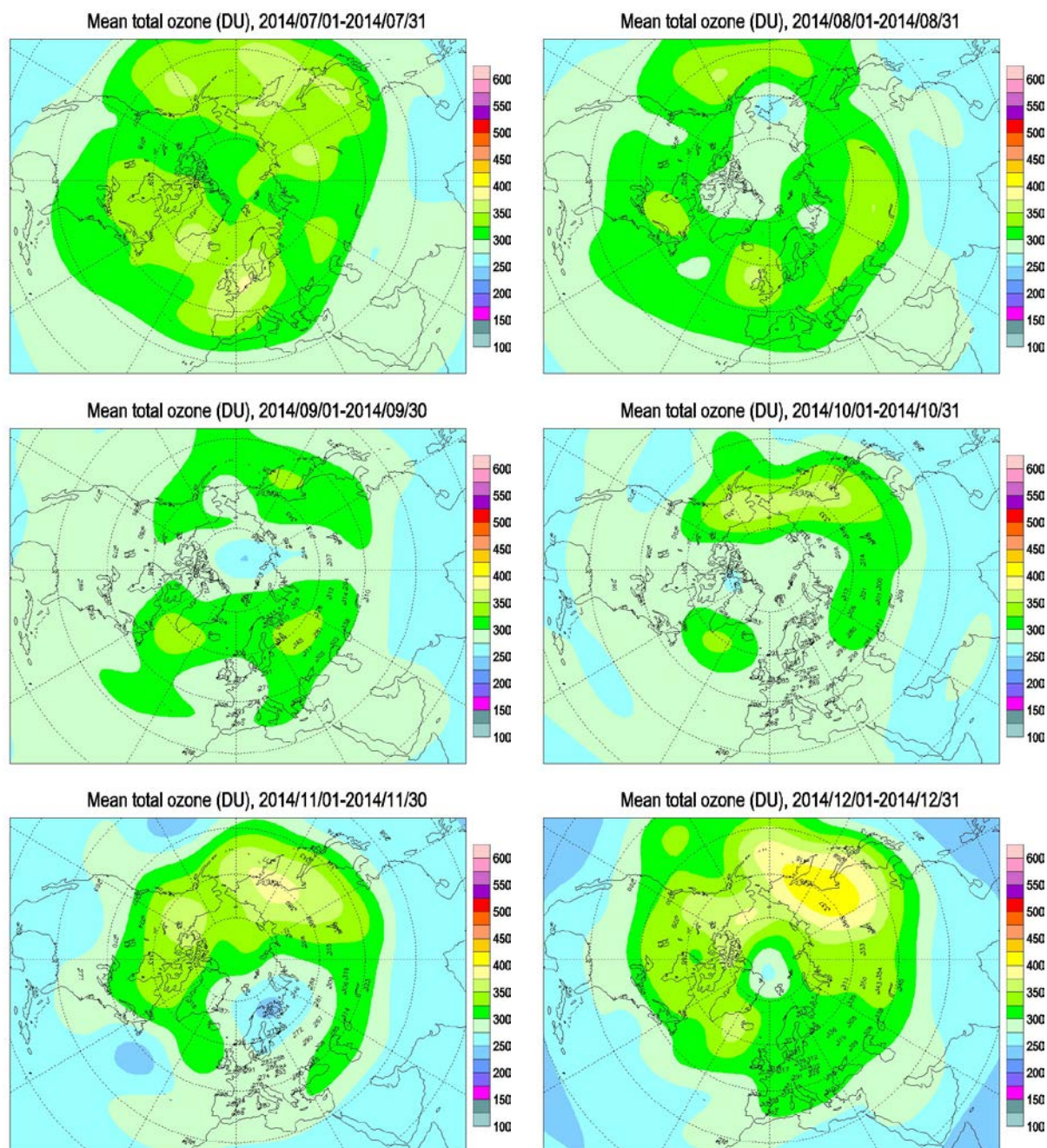


Рисунок 2.17 – Распределение озона над северными полярными широтами во второй половине 2014 года.

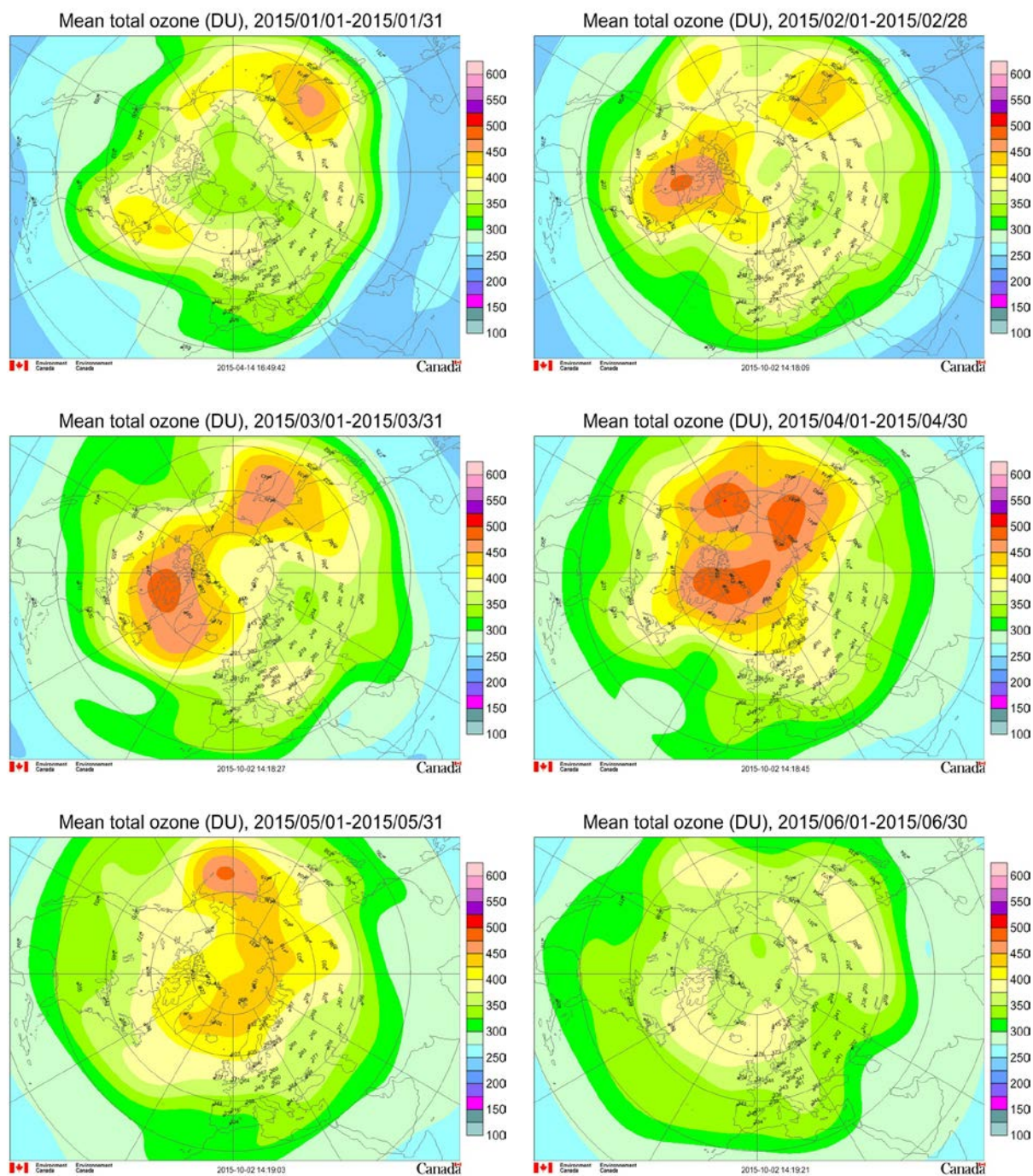


Рисунок 2.18 – Распределение озона над северными полярными широтами в первой половине 2015 года.

В начале января 2015 года наблюдалось малое ВСП. Максимальные средние значения ОСО наблюдались в апреле (498 ед.Д.). Фаза КДК в начале года восточная, в конце – западная. Высокие значения ОСО в некоторых регионах в начале года в 2010 и 2012 годах так же наблюдались одновременно с переходной фазой КДК.

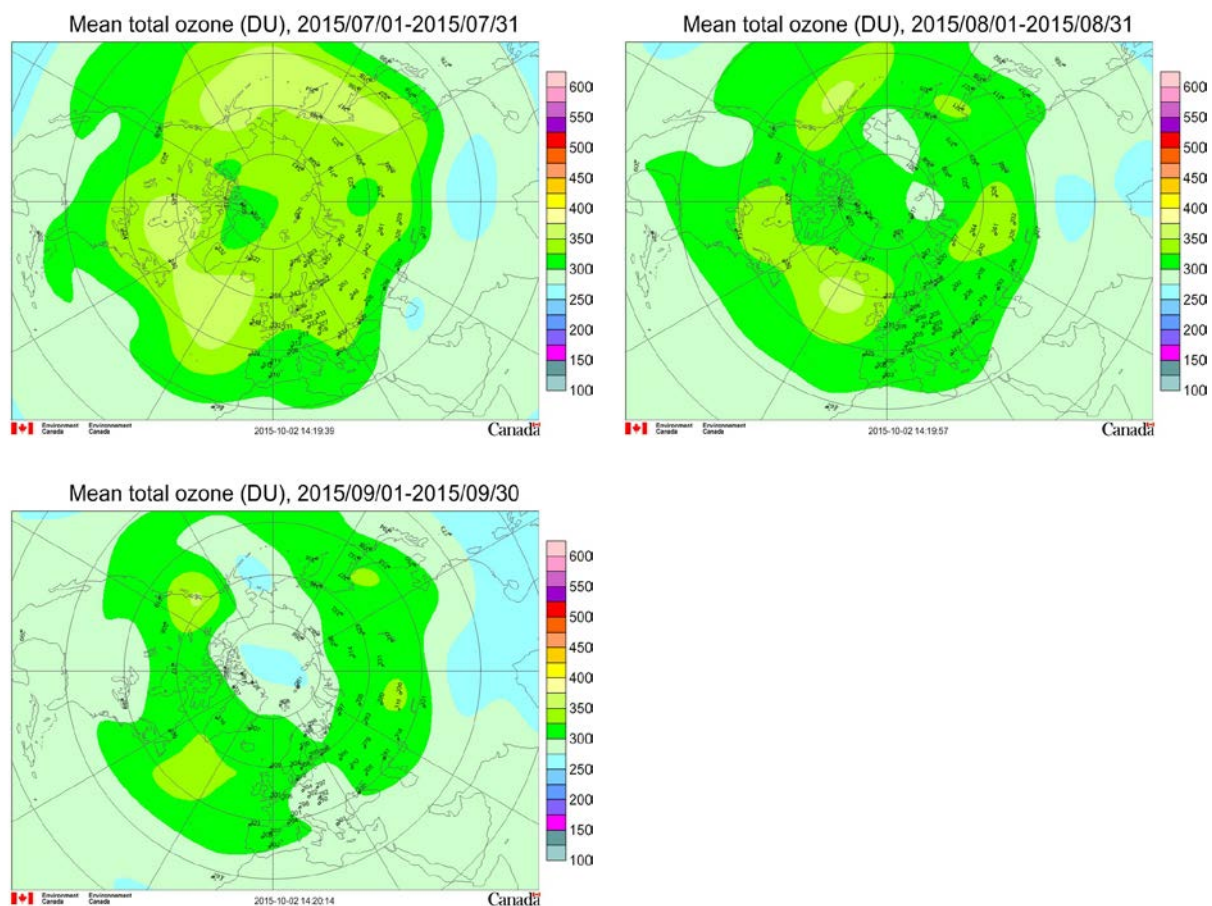


Рисунок 2.19 – Распределение озона над северными полярными широтами во второй половине 2015 года.

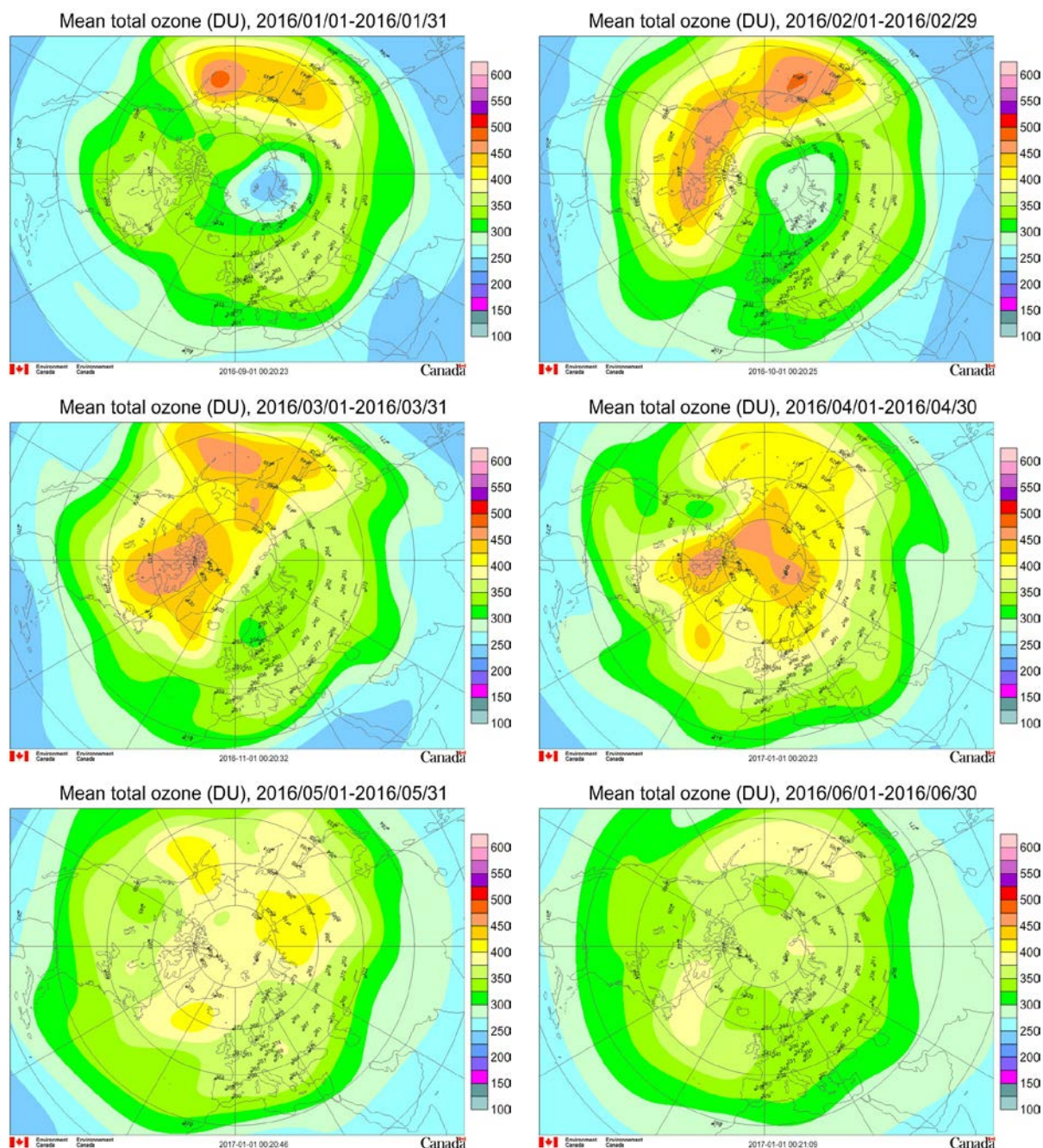


Рисунок 2.20 – Распределение озона над северными полярными широтами в первой половине 2016 года.

В январе и феврале 2016 года над Карским морем видна область пониженных значений ОСО. В октябре и ноябре область пониженных значений над Белым морем и прибрежными территориями была выражена не так сильно как обычно. Фаза квазидвухлетнего колебания была, в начале года западная, в середине – восточная, а в конце опять западная. на рис.2.6.,

видно, что в 2016 году распределение скоростей ветра было не типично для этого явления.

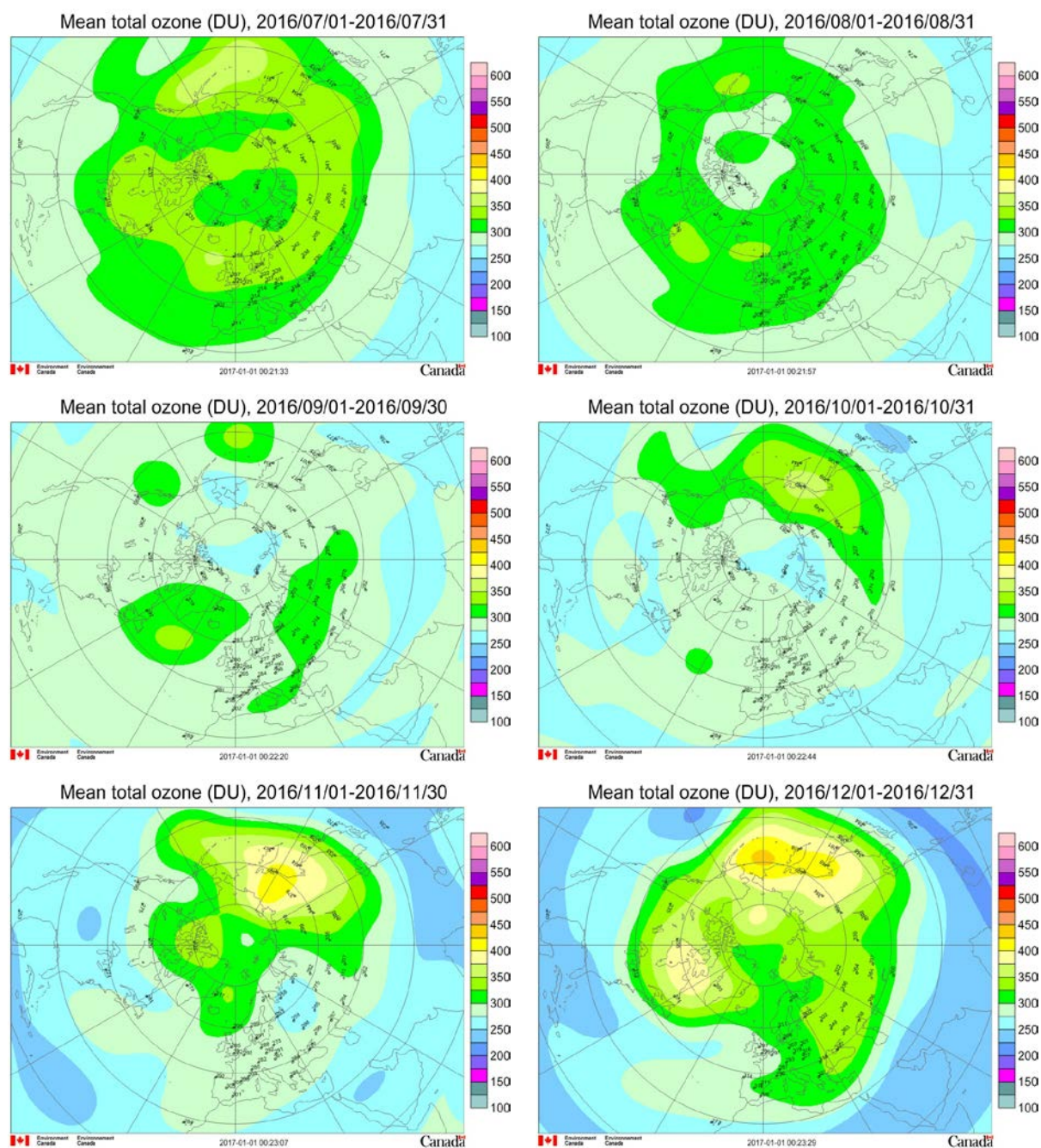


Рисунок 2.21 – Распределение озона над северными полярными широтами во второй половине 2016 года.

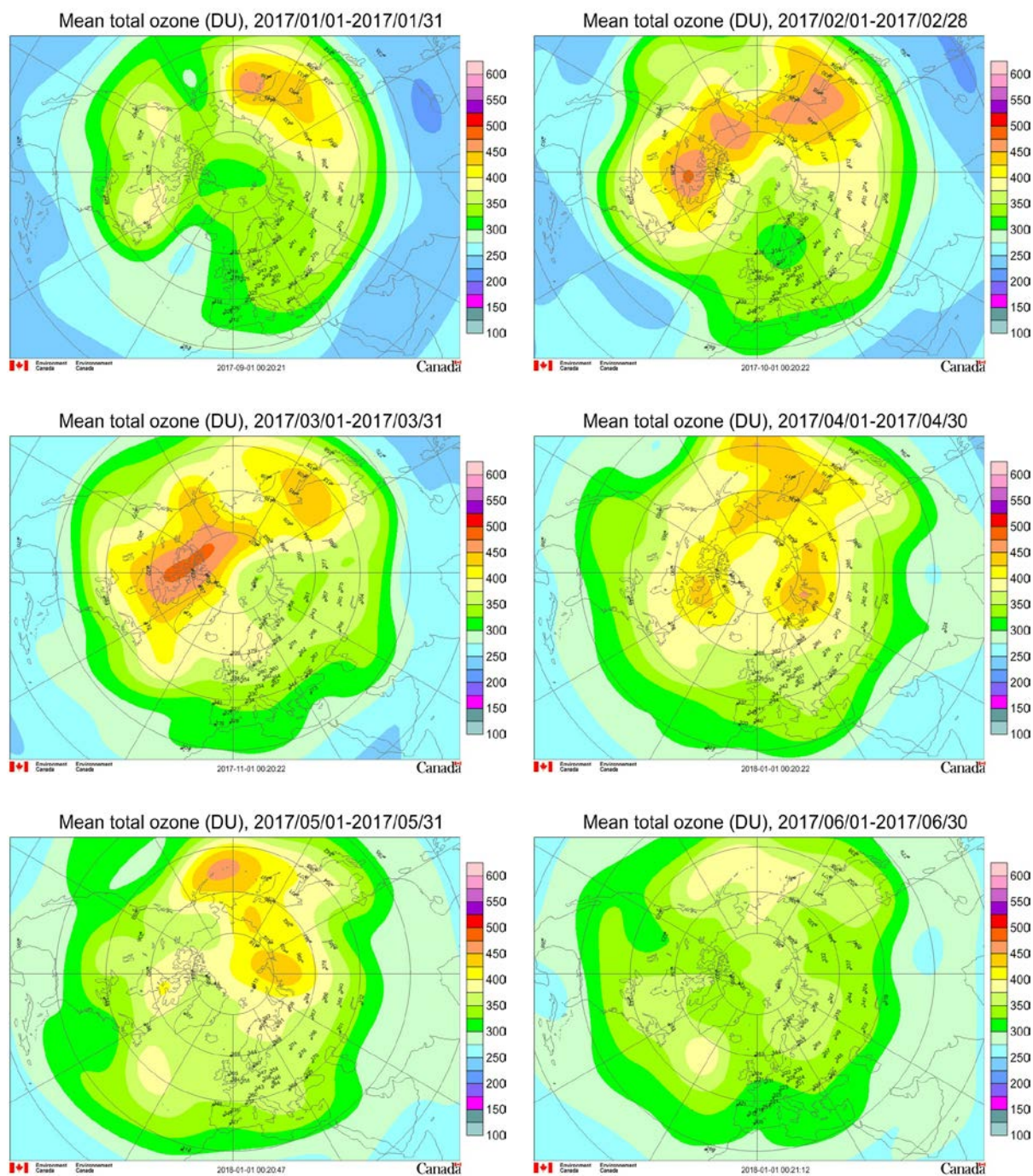


Рисунок 2.22 – Распределение озона над северными полярными широтами в первой половине 2017 года.

Во второй половине 2017 года летнее падение ОСО над полюсом было более значительным, чем в предыдущие годы (до 191 ед.Д. в октябре). Фаза КДК весь год была западной.

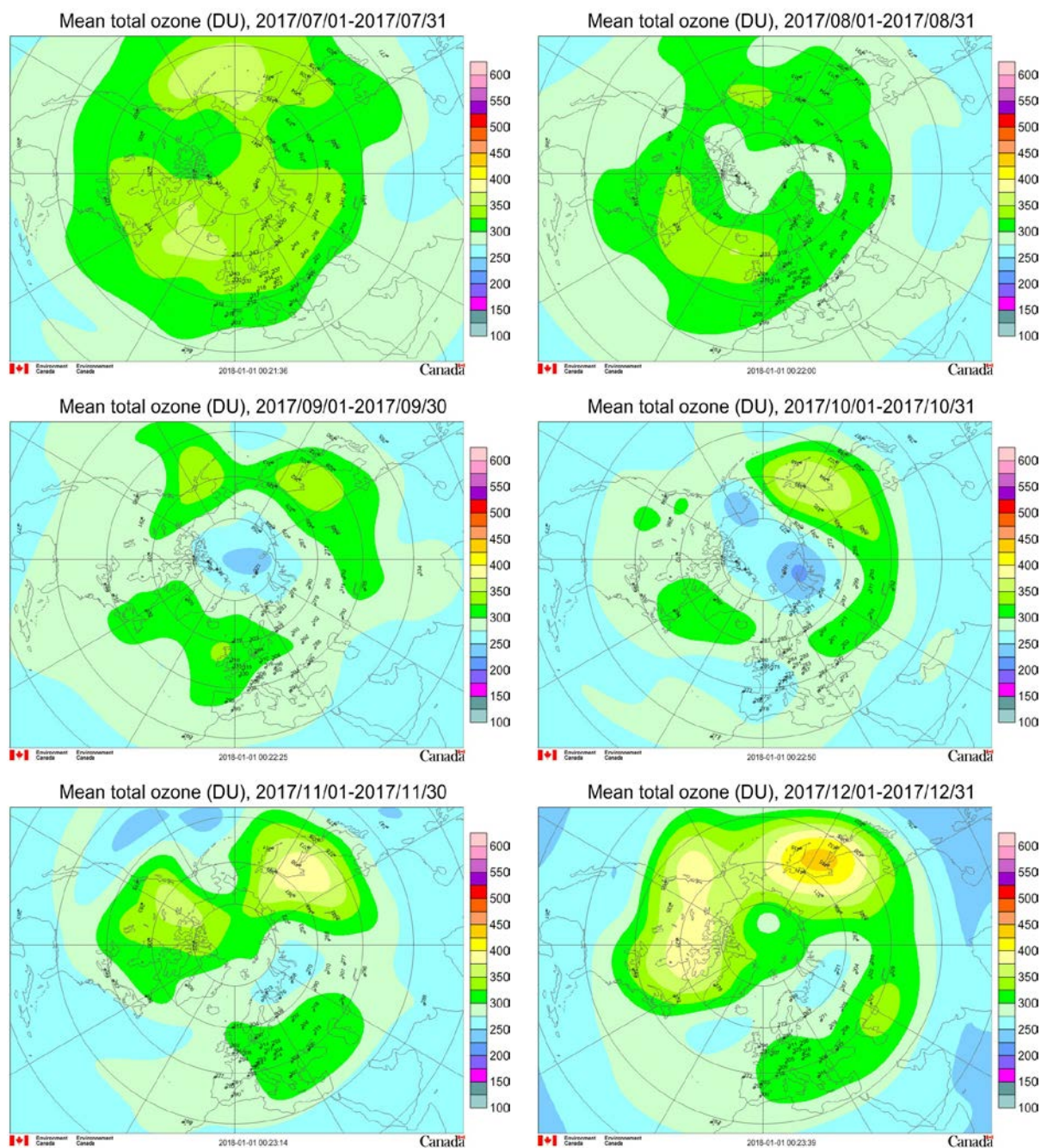


Рисунок 2.23 – Распределение озона над северными полярными широтами во второй половине 2017 года.

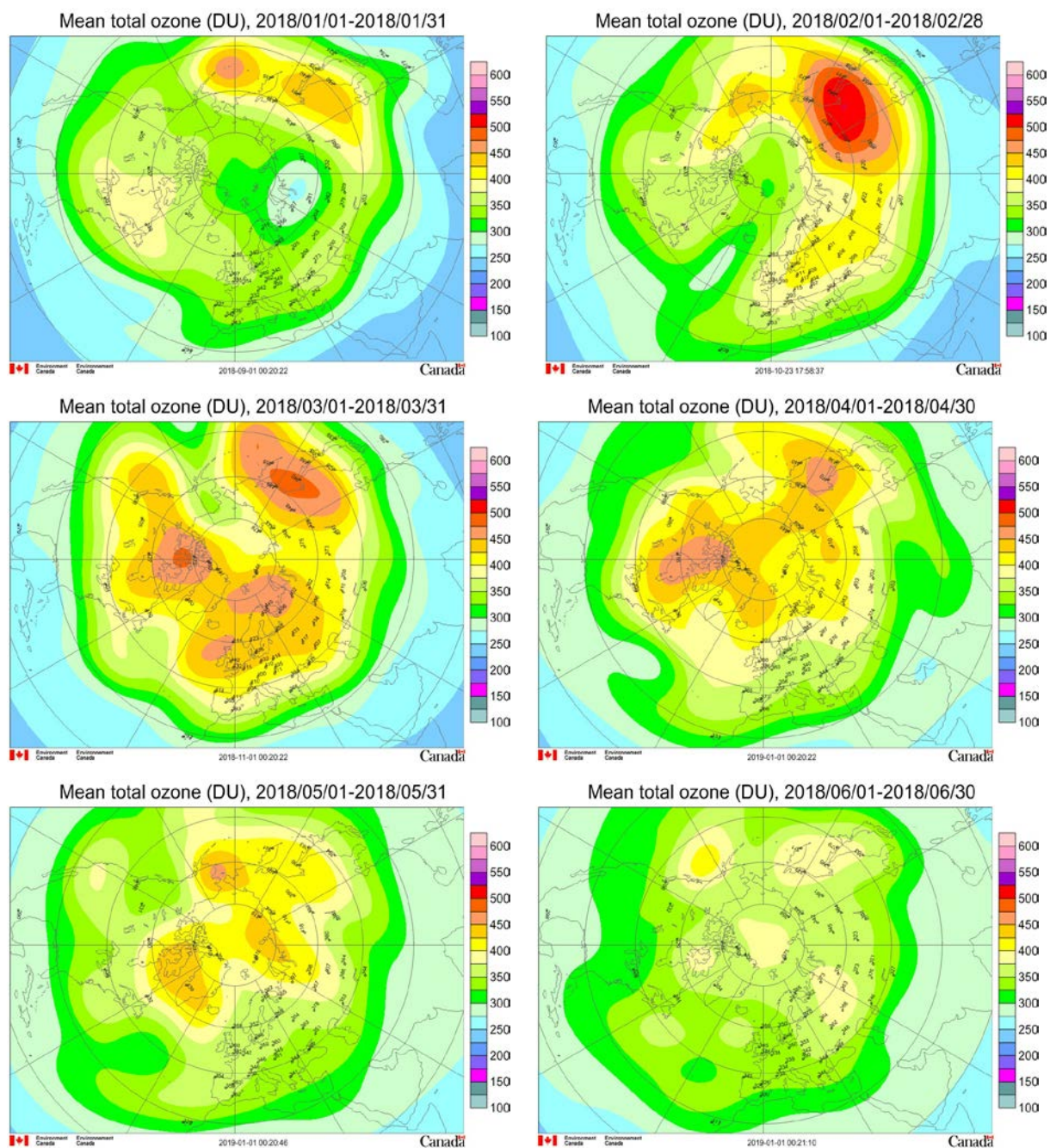


Рисунок 2.24 – Распределение озона над северными полярными широтами в первой половине 2018 года.

В феврале 2018 наблюдались максимальные средние значения ОСО более 500 ед.Д.. Во второй половине так же область низкого ОСО над Белым морем. Фаза КДК в течение всего года - восточная.

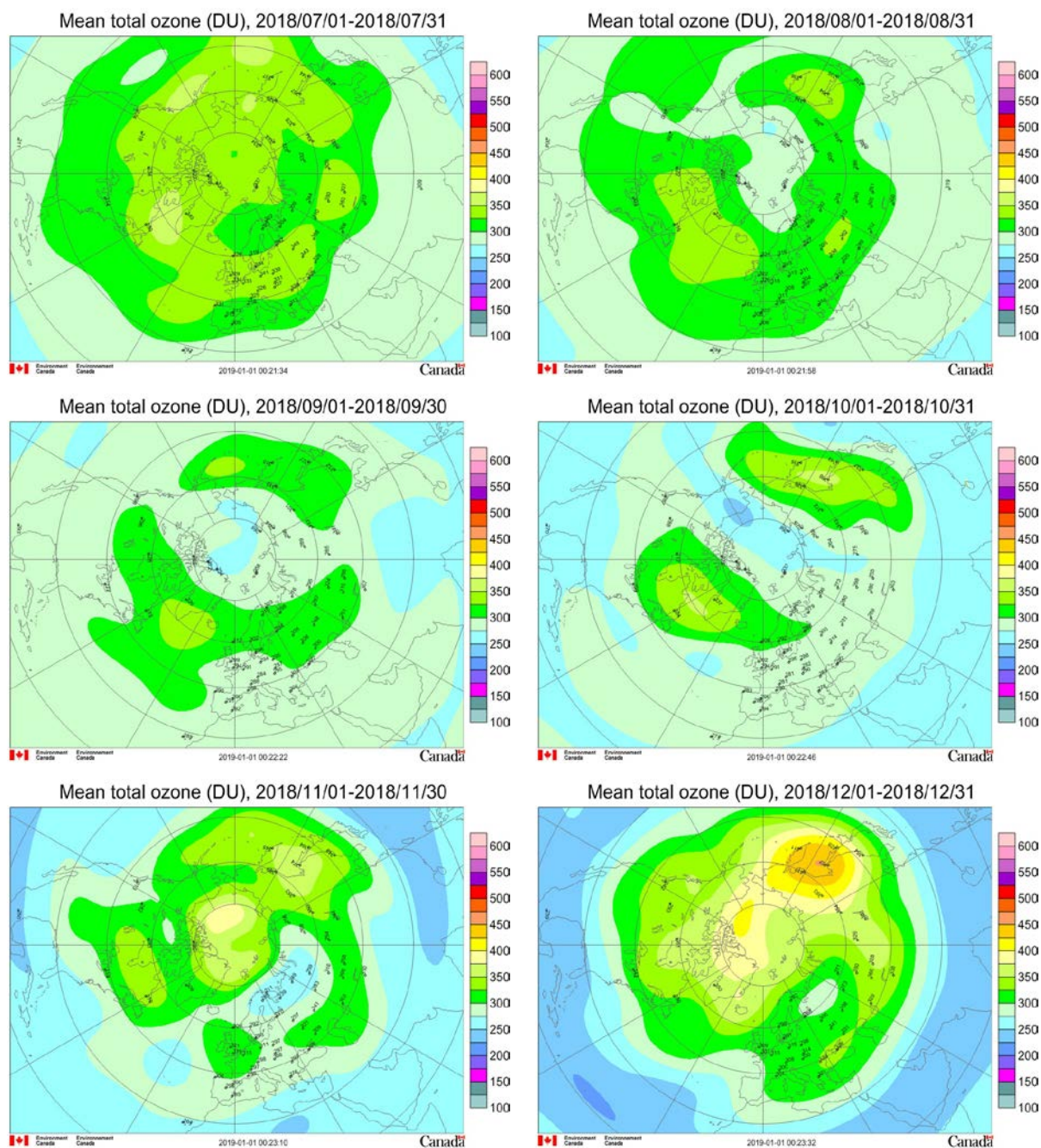


Рисунок 2.25 – Распределение озона над северными полярными широтами во второй половине 2018 года.

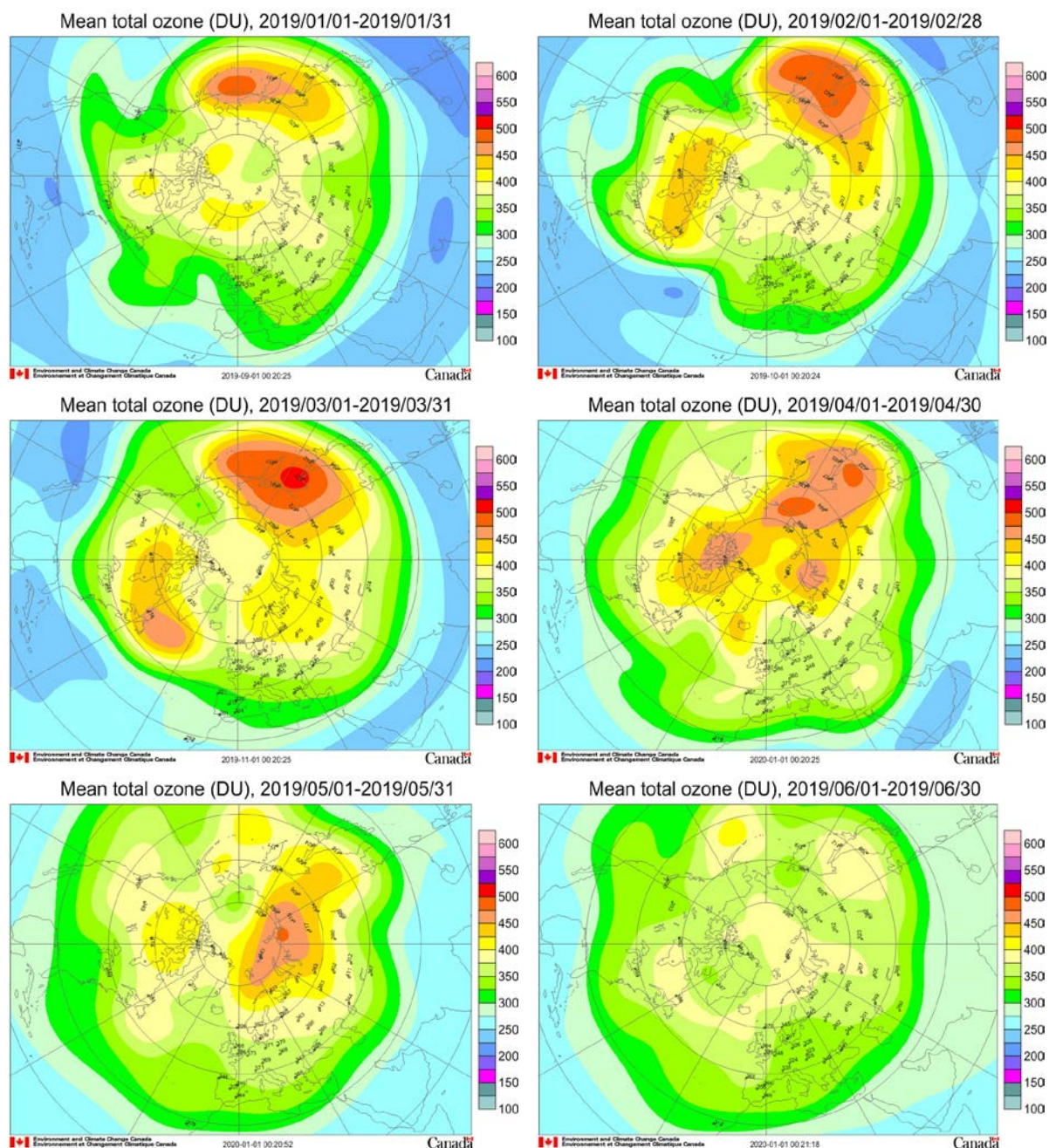


Рисунок 2.26 – Распределение озона над северными полярными широтами в первой половине 2019 года.

В 2019 году максимальное среднее ОСО (537 ед.Д.) наблюдалось в марте. В ноябре самые низкие значения зафиксированы над севером Канады, хотя минимум над Белым морем также наблюдался, но не такой выраженный. Фаза КДК весь год была западной.

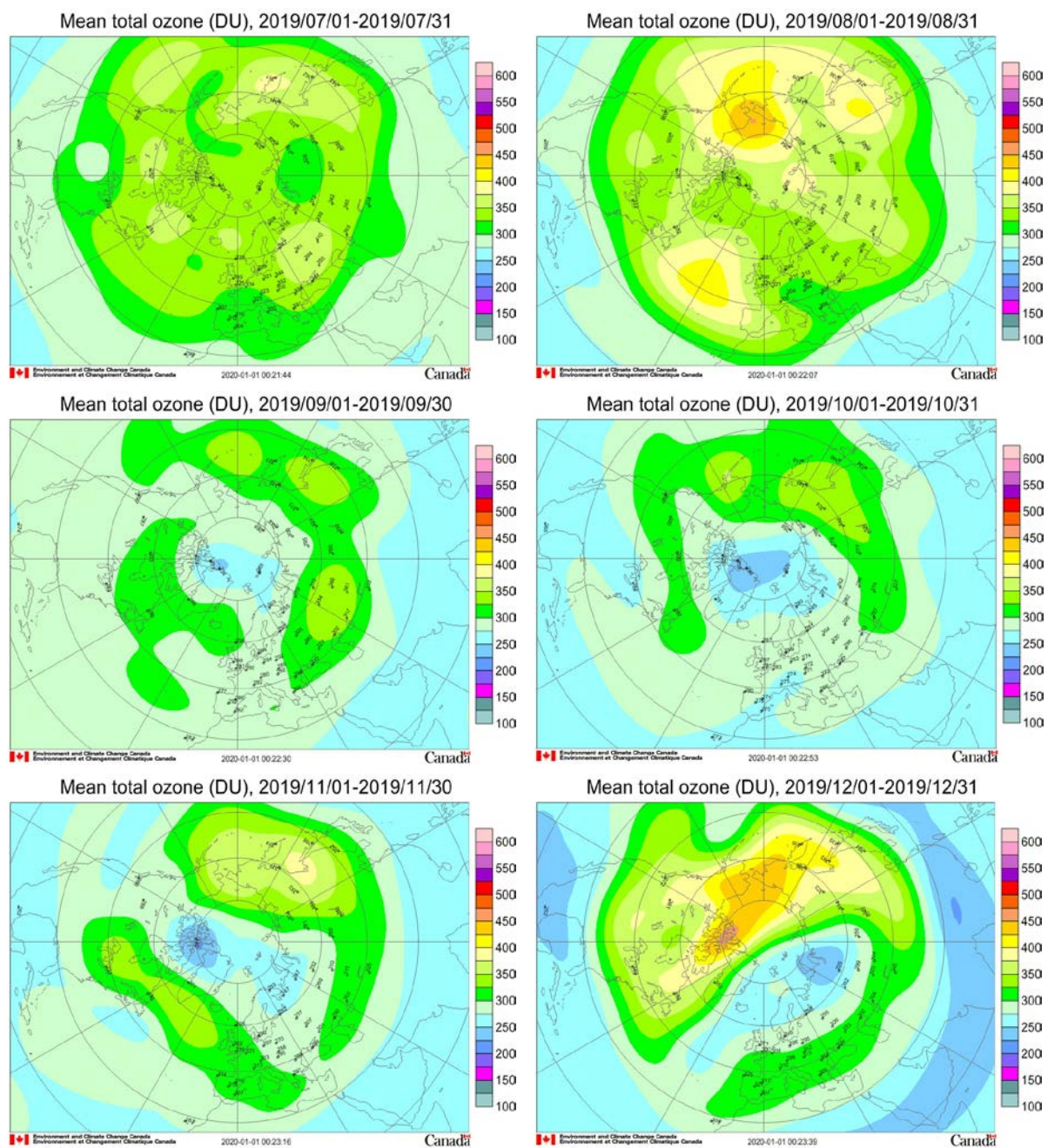


Рисунок 2.27 – Распределение озона над северными полярными широтами во второй половине 2019 года.

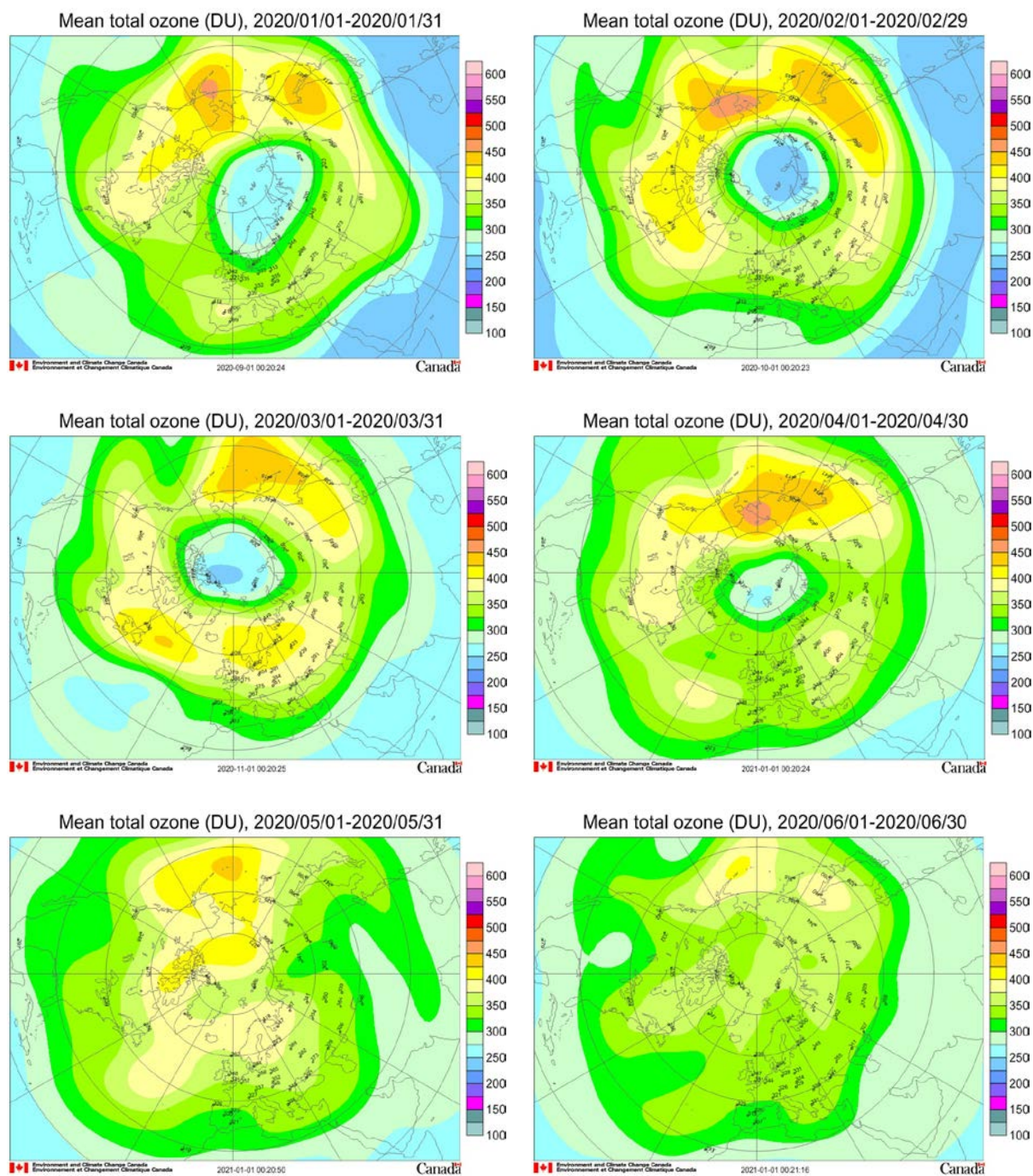


Рисунок 2.28 – Распределение озона над северными полярными широтами в первой половине 2020 года.

С января по апрель 2020 года над полюсом наблюдалась область низкого ОСО. Фаза КДК в первый месяц года была западной, в середине года - восточной, а в конце снова западной. В 2016 году в течение первых двух месяцев тоже наблюдалась область пониженного ОСО над Карским морем

при похожем сценарии смены фаз квазидвухлетнего колебания, хотя в 2016 году западная фаза в начале года длилась дольше.

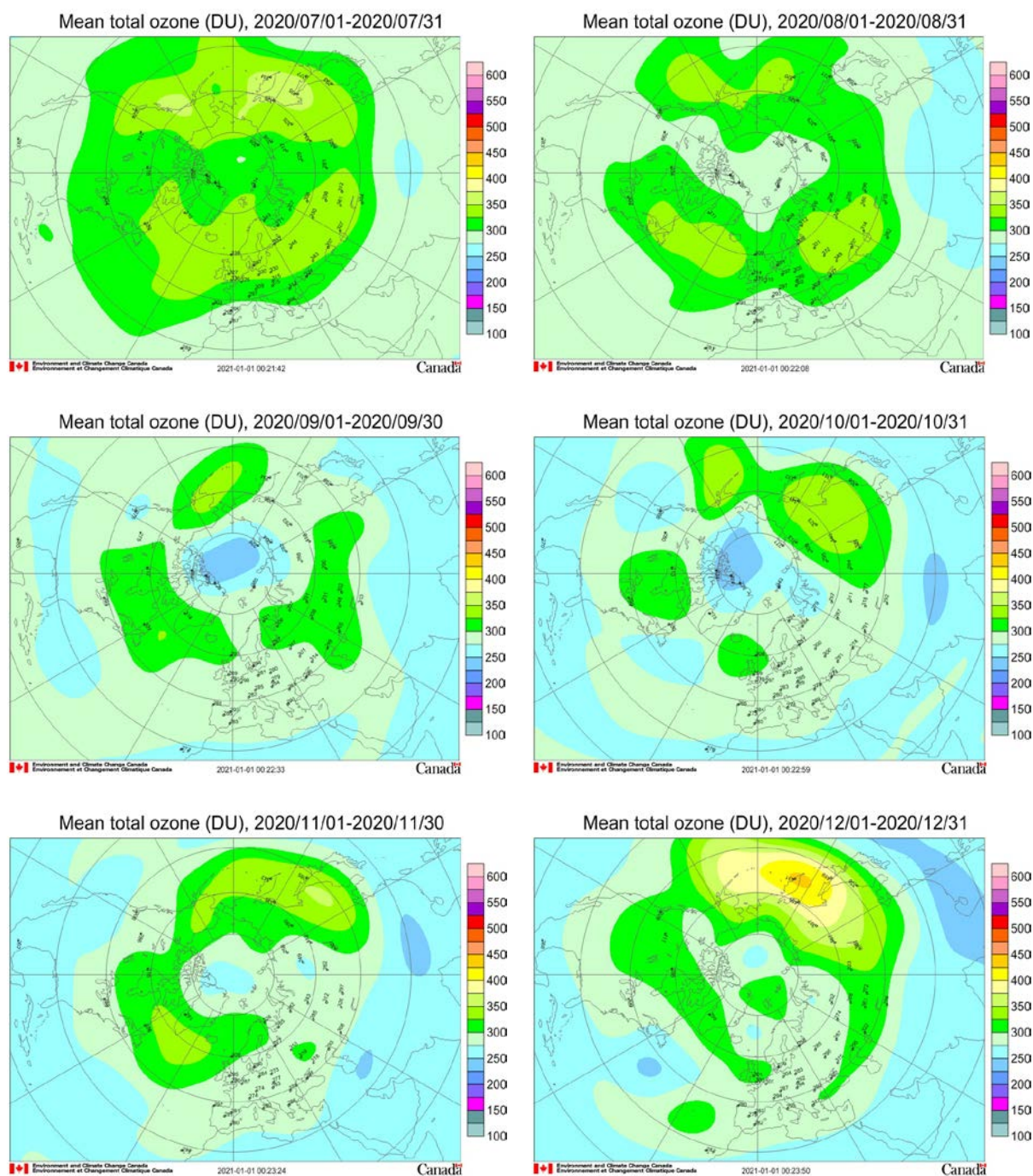


Рисунок 2.29 – Распределение озона над северными полярными широтами во второй половине 2020 года.

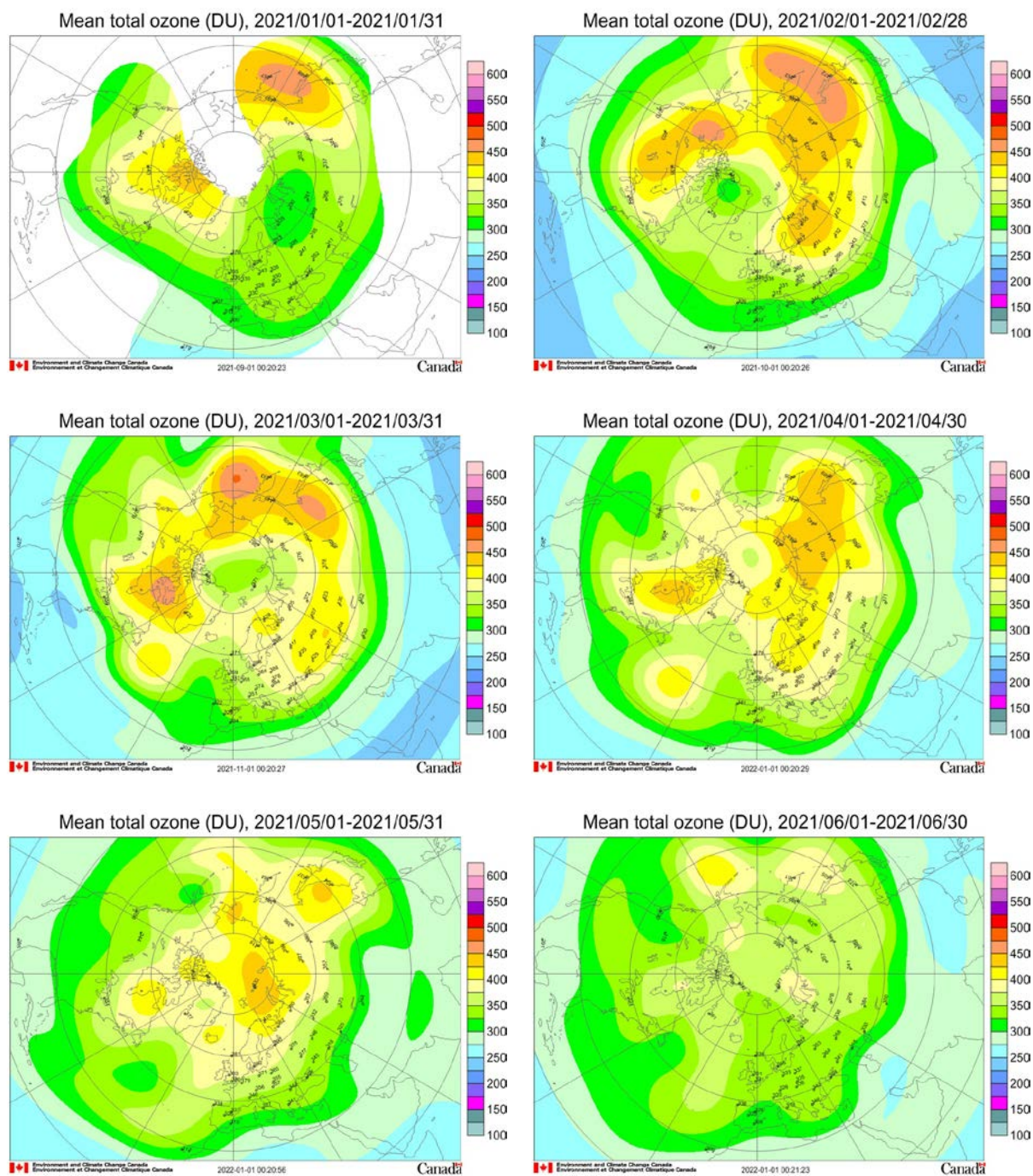


Рисунок 2.30 – Распределение озона над северными полярными широтами в первой половине 2021 года.

В 2021 году фаза КДК была большую часть была года западной, в декабре - восточная. Похожий сценарий смены фаз КДК в течение года происходил в 2017 году, тогда же в октябре минимальные средние значения ОСО были 191 ед.Д. В 2021 году на той же станции (остров Хейса) зафиксировано среднее значение 168 ед.Д. 220 в октябре 2011, тоже

над островом Хейса при том что в 2011 весь год была западная фаза КДК. В 2009 минимум был (226 ед.Д,) зафиксирован несколькими станциями на территориях Архангельской области и республики Коми. Тем не менее, минимум над островом Хейса фиксировался и в другие годы, с сильно отличающимися от 2021 года сценариями смены фазы КДК, например в 2012 222 ед.Д и 237 ед.Д в 2018 году.

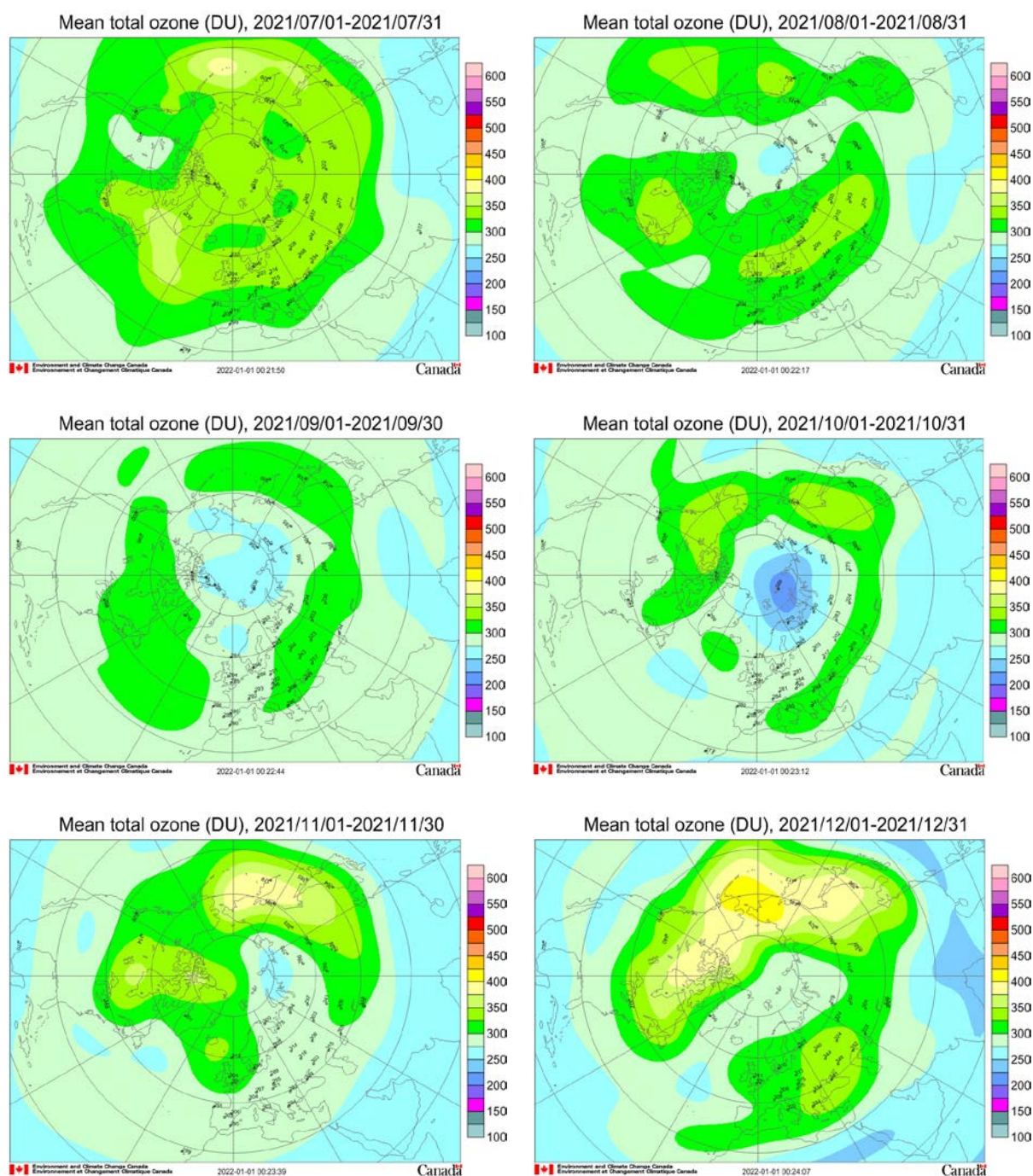


Рисунок 2.31 – Распределение озона над северными полярными широтами во второй половине 2021 года.

Заключение

Озон является аллотропной модификацией кислорода, обладающей большой реакционной способностью и образующейся в результате воздействия на кислород частиц высокой энергии.

Основная масса природного озона образуется в стратосфере из молекул кислорода O_2 в результате поглощения излучения Солнца с длиной волны около 180нм, благодаря чему поверхности Земли достигают только то излучение, которое не опасно для живых организмов. Озон играет большую роль в тепловом балансе Земли. Поглощая коротковолновую радиацию Солнца, он разогревает атмосферу Земли.

Убыль озона в атмосфере земли началась тогда, когда концентрации озоноразрушающих соединений в стратосфере стало заметно возрастать. Это событие заставило мировое сообщество принять меры для уменьшения производства и выбросов озоноразрушающих веществ.

Ослабление озонового слоя ведет к усилению потока солнечной радиации на Землю, что может являться причиной роста числа онкологических заболеваний кожи у людей. Также повышенный уровень излучения ведет к резкому увеличению смертности среди морских животных и растений. Отсюда очевидна необходимость охраны стратосферного озона и участия всех стран в данных мероприятиях.

Проанализированные в работе данные об общем содержании озона за период с 1979 по 2019 говорят о действенности методов, предпринятых мировым сообществом для предотвращения истончения озонового слоя, однако о полном его восстановлении говорить еще рано.

Очевидна необходимость в мониторинге и дальнейшем изучении изменчивости общего содержания озона и его зависимости от химических и динамических процессов в стратосфере.

Образующийся в верхних слоях озон тяжелее молекулярного кислорода и постепенно опускается вниз. Но озон движется не только вверх-вниз, но и по горизонтали. Общее содержание озона характеризуется отчетливым сезонным ходом и географическим распределением.

Тропосферный озон находится в непосредственной близости от земной поверхности. Находясь в приземных слоях в больших концентрациях, он может отравить любой живой организм. Озон относится к первому (наивысшему) классу токсичности. Стоит отметить, что количество естественно возникающего озона в тропосфере не так велико, чтобы угрожать здоровью человека.

Приземный озон является вторичным загрязнителем атмосферы, то есть его возникновение провоцируется контактом солнечного излучения и разнообразных летучих соединений антропогенного происхождения, которые выбрасываются в атмосферу промышленными предприятиями, автотранспортом, котельными и другими предприятиями, использующими ископаемое горючее. Озон очень чувствительный загрязнитель воздуха, на окраинах городов его обычно больше, чем в центре.

Список использованных источников

1. В.Б. Кашкин, Т.В. Рублева, Р.Г. Хлебопрос. Стратосферный озон: вид с космической орбиты: монография. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015, 184с.
2. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. – Л.: Гидрометеиздат, 1973, 291с.
3. Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. – Л.: Гидрометеиздат, 1980, 288с.
4. Гущин Г.П., Виноградова Н.Н. Суммарный озон в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1983, 239с.
5. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010, 487с.
6. Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х. Озонный щит Земли и его изменения. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992, 288с.
7. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998, 480с.
8. http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/ozone.shtml
9. <http://exp-studies.tor.ec.gc.ca/clf2/e/ozoneworld.html>
10. https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/montreal_prot.shtml
11. Ф.С. Завелевич, Ю.М. Головин, А.В. Десятов, Ю.П. Мацицкий, А.Г. Никулин, А.С. Романовский, Г.Г. Горбунов, А.К. Городецкий, А.В. Воронкевич. Фурье-спектрометр для дистанционного зондирования атмосферы Земли
12. Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Сумерова К.А. Аномалии атмосферного озона в феврале-марте 2018 г. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 4 (370). С. 36-47.

13. Кашкин В.Б., Романов А.А., Рублева Т.В. Тренды общего содержания озона в 2005–2015 гг. по данным дистанционного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 9. С. 752-757.
14. Звягинцев А.М., Иванова Н.С., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Никифорова М.П. Мониторинг общего содержания озона и УФ облученности: основные результаты // Проблемы экологич. мониторинга и моделирования экосистем. 2017. Т. 28. № 6. С. 85-98.
15. Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С., Мохов И.И., Зуева Н.Е. Внезапные стратосферные потепления: статистические характеристики и влияние на общее содержание NO₂ и O₃ // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, №. 5. С. 545-555.
16. Никифорова М.П., Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Иванова Н.С., Лукьянов А.Н., Кузнецова И.Н. Аномально низкие уровни общего содержания озона над севером Урала и Сибири в конце января 2016 // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т.30, №1. С. 12-19
17. Г.Р. Хайруллина, Н.М. Астафьева Квазидвухлетние Колебания в атмосфере Земли Обзор: наблюдение и механизмы формирования), Москва, Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), 2011г, 60с.
18. Еланский Н.Ф. Российские исследования атмосферного озона и его предшественников в 2015-2018 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56, №. 2. С. 170-185.