



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Траекторное моделирование переноса загрязняющих веществ на
Европейской территории России»

Исполнитель Гостев Федор Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Смышляев Сергей Павлович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«15 » июня 2021 г.

Санкт-Петербург
2021

Аннотация

Представленная магистерская диссертация состоит из трех глав, введения и заключения. Объектом исследования являются концентрации приземного озона на европейской территории России.

В первой главе рассматривается такой загрязнитель, как приемный озон, рассматривается также тропосферный озон, оцениваются процессы формирования озона, также рассматриваются негативные эффекты, оказываемые данным загрязнителем на организм человека.

Во второй главе рассматриваются методы исследования, а именно траекторная модель HYSPLIT, рассматриваются некоторые примеры исследований с использованием данной модели, также оцениваются основные этапы развития и последние нововведения в данной модели. Помимо этого, вводится некоторая характеристика реанализа ERA 5.

В третьей главе производится оценка приземного озона на европейской территории России за последние годы, рассматриваются некоторые сезонные особенности, производится выбор пунктов для исследования, также оценивается расположение предвестников озона, приводятся результаты моделирования и их анализ.

В заключении приводятся краткие выводы по проведенным исследованиям.

Оглавление	
Актуальность работы	3
1. ПРИЗЕМНЫЙ ОЗОН КАК ЗАГРЯЗНИТЕЛЬ ВОЗДУХА	6
1.1 Общие сведения об озоне, история открытия.....	6
1.2 Негативное влияние приземного озона на здоровье человека.....	13
1.3 Процессы образования приземного озона.....	20
2. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	27
2.1 Траекторная модель HYSPLIT	27
2.1.1 Общие сведения о модели	27
2.1.2 История модели HYSPLIT.....	31
2.1.3 Модель HYSPLIT в последние годы	38
2.2 Данные реанализа ERA 5	48
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА НАД ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ РФ ...	53
3.1 Пункт 1 (Московский регион)	64
3.2 Пункт 2 (точка находится восточнее Санкт-Петербурга).....	70
3.3 Пункт 3 (Прикаспийский район)	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	85
Список использованной литературы.....	86

Актуальность работы

Актуальность данной работы обусловлена тем, что оценка качества атмосферного воздуха сейчас крайне важна, так как с каждым годом увеличивается антропогенное влияние человека на природу в целом и атмосферу в частности [2,3]. Контролю приземного озона в настоящее время уделяется повышенное внимание. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) относит приземный озон к пятерке основных соединений, концентрации которых в приземном воздухе необходимо измерять и контролировать для оценки качества воздуха (помимо озона, контролю подлежат такие соединения, как диоксид серы, диоксид азота, монооксид углерода и взвешенные вещества) [46], стоит отметить, что из всех этих загрязнителей только озон имеет первый класс опасности [45].

Приземный озон является вторичным загрязнителем атмосферы, это означает, что нет наземных природных, или антропогенных источников выбросов этого загрязняющего вещества в атмосферу. Основными источниками повышенных концентраций озона в приземном слое атмосферы являются реакции с участием оксидов азота (NO_x), углеродных загрязняющих веществ (CO) летучих органических соединений (ЛОС, или VOC) и некоторых других веществ, все выше перечисленные соединения принято называть предвестниками озона [1].

Существует несколько причин локального повышения концентраций приземного озона: во-первых, увеличение его содержания может происходить под влиянием химических реакций с участием предвестников, выброшенных в атмосферу, непосредственно, вблизи исследуемой точки [15], во-вторых, богатая озоном воздушная масса может перемещаться и оказывать значительное влияние на качество воздуха в районах, в достаточной степени удаленных от мест выброса предвестников (такой озон называется подветренным [1]), в-третьих, приземный озон может

увеличиваться из-за вторжения стратосферного воздуха, в котором озона намного больше, чем в тропосфере [50]. В оценке того, что является ключевым фактором в повышении концентраций озона в отдельной точке нам могут помочь траекторные модели, которые способны опираясь на большое количество входных данных построить наиболее приближенные к реальным траектории перемещения воздушных масс [24,27].

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является оценка вклада локальных источников и переноса воздушных масс на концентрации приземного озона для различных точек на Европейской территории России

Для достижения цели работы решались следующие задачи:

1. На основе данных реанализа выделить сезонные и географические особенности распределения озона на Европейской территории России
2. Оценить распределение различных предвестников озона на Европейской территории России
3. Провести траекторное моделирование для оценки вклада переноса воздушных масс в увеличение концентрации озона в отдельных точках.

Научная новизна исследования

1. Получены новые оценки особенностей распределения приземного озона на Европейской территории РФ по данным ре-анализа;
2. Получены новые выводы о степени влияния источников предвестников приземного озона на увеличение его содержания в отдельных районах;
3. Получены новые оценки влияния атмосферного переноса на увеличение содержания приземного озона в отдельных районах.

Положения, выносимые на защиту

1. Приземные концентрации озона в значительной степени определяются не только локальными источниками предвестников, но и атмосферным переносом;
2. В крупных городах и промышленных районах окислы азота в большей степени разрушают приземный озон, а в пригородах способствуют увеличению его концентрации
3. Для Европейской территории России большую роль оказывает перенос озона из Европы и средней Азии

1. ПРИЗЕМНЫЙ ОЗОН КАК ЗАГРЯЗНИТЕЛЬ ВОЗДУХА

1.1 Общие сведения об озоне, история открытия

Озон – это состоящая из трёх атомов аллотропная модификация кислорода O_3 . Составляющая единица многих органических и минеральных веществ, в том числе и такого как озон – химический элемент, обозначение которого O – кислород, в переводе с греческого «*oxys*» - кислый, и «*gignomai*» - рождать. Впервые новую аллотропную модификацию кислорода во время опытов с электрическими разрядами обнаружил в 1785 году голландец Мартин ван Марун [54], его внимание привлёк специфический запах. А веком позже француз Шенбейн отметил присутствие такого же после грозы, в результате чего газ был назван «пахнущий» [54]. Но учёные несколько обманулись, считая, что их обоняние учуяло сам озон. Запах, который они чувствовали, принадлежал органическим соединениям, окисленным при взаимодействии с O_3 , так как газ очень реакционноспособен. Для образования озона, химический элемент кислород должен находиться в газообразной среде в виде отдельных атомов. Такие условия создаются при соударении молекул кислорода O_2 с электронами во время электрических разрядов или другими частицами с большой энергией, а также при его облучении ультрафиолетом [47]. Львиная доля от общего количества озона в естественных условиях атмосферы образуется фотохимическим способом [49].

В природных условиях озон постоянно образуется в стратосфере из кислорода и разлагается в атмосфере в ходе естественных фото- и термохимических реакций [29]. Фотохимическая теория образования и разрушения озона в стратосфере впервые была сформулирована в 1930 г. С. Чепменом [30], его схема описывает пять чисто кислородных реакций образования и распада стратосферного озона под действием УФ-излучения.

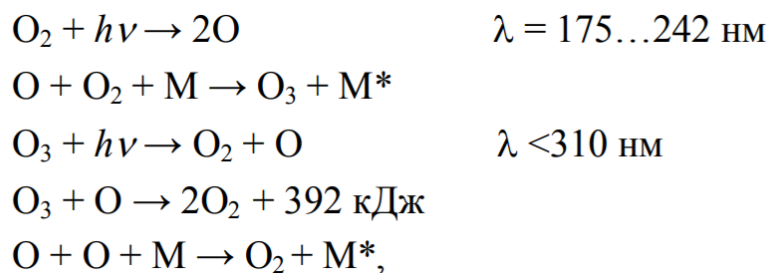


Рис. 1 – Цикл Чепмена, где где $h\nu$ – квант излучения, М – молекула O_2 , или N_2 , которая принимает на себя избыток колебательной энергии и переходит в возбужденное состояние M^* .

Суть процесса образования озона заключается в том, что на первом этапе молекулы кислорода под действием жесткой солнечной радиации диссоциируют на атомы кислорода. Возбужденный атомарный кислород далее взаимодействует с молекулой кислорода с образованием озона. Одновременно с поглощением кванта света молекулой озона (основная реакция стока озона) происходит распад ее на молекулярный и атомарный кислород. Последний может вновь взаимодействовать с молекулой кислорода, образуя озон. Результатом существования цикла озона в стратосфере является то, что УФ-излучение Солнца превращается в тепловую энергию.

Взаимодействие излучения с O_2 идет по всей атмосфере – в мезосфере, в стратосфере и верхней тропосфере [30]. Скорость реакций образования O_3 в цикле Чепмена слабо зависит от температуры, а скорость реакций разложения – довольно существенно [29].

Проведенные в начале 1960-х гг. теоретические расчеты констант скоростей реакций цикла Чепмена показали, что озон должен образовываться в этом цикле намного интенсивнее, чем разрушаться [48].

Существует и иная точка зрения на механизм образования озона в атмосфере [47]. Предполагают, что при поглощении коротковолнового ультрафиолетового излучения часть молекул кислорода ионизируется, теряя

электрон, приобретая положительный заряд, а часть - диссоциирует на нейтральные атомы. Свободные электроны, появившиеся в результате ионизации, могут поглощаться нейтральными атомами кислорода, образуя отрицательно заряженный ион. При взаимодействии таких разноименных заряженных ионов образуются молекулы озона. Однако высказывается мнение о том, что этот путь синтеза озона не может реализоваться, поскольку для его осуществления необходимо жесткое ионизирующее излучение, которое не проникает в атмосферу на высоту 50-80 км, где происходит синтез озона [47].

Наибольшее количество озона образуется преимущественно в верхней стратосфере над экваториальным поясом, где достаточно солнечной энергии для разрушения молекул кислорода [50]. При этом минимальное общее содержание озона наблюдается над экваториальным поясом, но возрастает в направлении полюсов (рисунок 2). Причиной такого распределения является циркуляция Брюера-Добсона, переносящая богатые озоном воздушные массы в сторону полюсов [30].

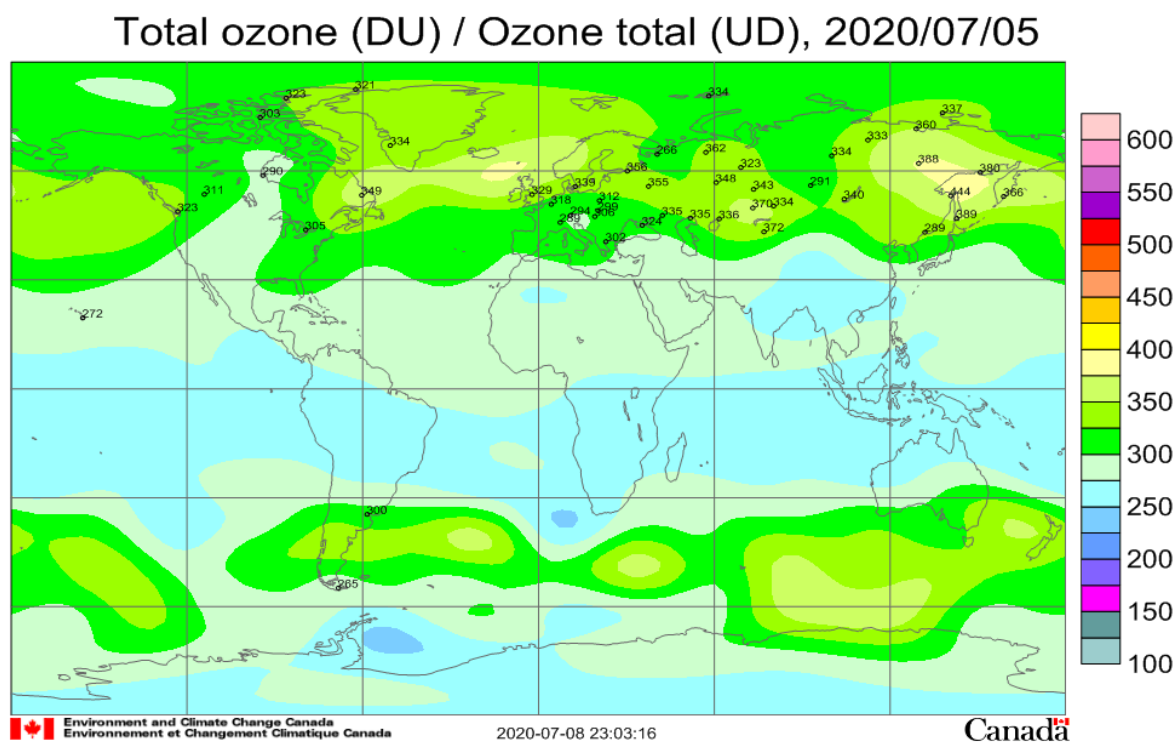


Рис. 2 - Распределение общего содержания озона по земному шару.

Озон относится к малым газовым компонентам атмосферы, которые в наибольшей степени подвержены влиянию человеческой деятельности [46]. Поэтому одна из наиболее острых химических проблем глобального масштаба связана с опасностью антропогенного воздействия на химические процессы в стратосфере, чреватые уменьшением в ней общего содержания озона [29]. Изменение содержания озона под действием антропогенных загрязнителей атмосферы, фиксируемое в настоящее время, может оказать губительное действие для живых форм Земли [4,5].

В реальных условиях весь озон неравномерно распределен в слое воздуха от поверхности Земли практически до верхней границы мезосферы [48]. Характер этого распределения связан с процессами образования и гибели озона, зависит от времени года и географической широты местности. Основная масса озона в виде опоясывающего Землю пояса расположена на высоте от 10 до 50 км с максимумом концентрации на высоте 24- 27 км над экватором и 13-15 км над полярными областями обоих полушарий [29] (Рис. 3).

Количество озона в атмосфере крайне мало по сравнению с основными газами атмосферы [30], но, несмотря на это, озон, играет важную роль в различных физических процессах, происходящих в верхних слоях (стратосфере и мезосфере) и у поверхности земли [30]. Озоновый слой возник в атмосфере Земли 1,85—0,85 млрд лет назад, когда в ней вследствие фотосинтеза накопилось достаточно кислорода [32]. Лишь после образования озонового слоя жизнь (включая растения) смогла выйти из океанов, без этого высокоразвитые формы жизни типа млекопитающих, включая человека, не возникли бы, т.к. были бы уничтожены жестким ультрафиолетом Солнца, который поглощается атмосферным озоном [30]. Около 90 % атмосферного озона находится в стратосфере, главным образом на высоте от 20 до 40 км над поверхностью Земли [31]. Его концентрация в стратосфере составляет от 2 до 12 частей на миллион [30]. Общее количество озона в атмосфере таково,

что если бы можно было весь его переместить на уровень моря и сконцентрировать до атмосферного давления при температуре 0 °С, он занял бы слой высотой всего 3 мм (это соответствует 300 единицам Добсона) [29].

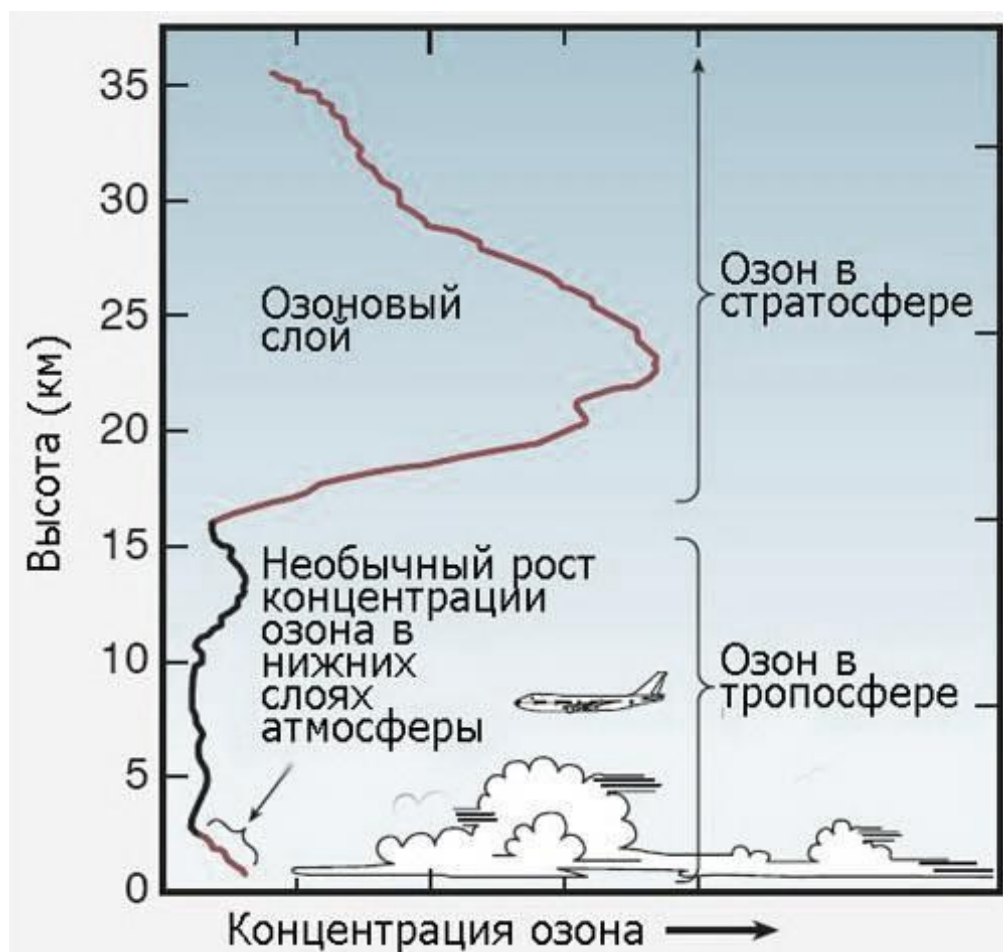


Рис.3 – распределение озона в атмосфере с высотой

Вот такое небольшое количество этого газа защищает нас от ультрафиолетового излучения, эти лучи обладают высокой биологической активностью: они убивают многие виды бактерий, вызывают загар и даже ожоги человеческой кожи, содействует образованию в организме витамина D, способствующего росту и предупреждающего рахит. Озоновый слой поглощает от 97 до 99 % солнечного излучения в области длин волн от 200 до 315 нм [48]. Озон сильно поглощает ультрафиолетовую радиацию с

длиной волны от 0,22 до 0,29 мкм. Коэффициенты поглощения озона в этом участке спектра настолько велики, что энергия солнечных лучей полностью поглощается уже в самой верхней части слоя озона, на высотах до 50 - 45 км [48]. Озон, также, регулирует жесткость космического излучения. Если этот газ хотя бы частично уничтожается, то, естественно, жесткость УФ излучения резко возрастает, а, следовательно, происходят реальные изменения растительного и животного мира. Уже доказано, что отсутствие или малая концентрация озона может или приводит к раковым заболеваниям, что самым наихудшим образом отражается на человечестве и его способностью к воспроизводству [46], подробнее о негативном влиянии на здоровье человека будет написано ниже. Распределение озона по высоте (до 30 км) было изучено с помощью спектрографов, поднимаемых на шарах-зондах [32]. В последние десятилетия измерения с помощью спектрографов произведены на ракетах [30]. Ракетные данные позволили изучить спектр солнечной радиации в ультрафиолетовом участке и распределение плотности озона по высоте [30].

Также озон поглощает некоторую часть инфракрасного излучения Земли. Благодаря этому он задерживает около 20% излучения Земли, усиливая парниковый эффект атмосферы [31].

Из внешних факторов, на величину общего содержания озона, более всего влияют вариации солнечной активности. В ходе 11-летнего цикла поток солнечной радиации в УФ-диапазоне существенно изменяется, что сказывается на скорости образования озона и увеличении его количества [54].

Время жизни молекул O_3 на высотах около 40 км составляет всего лишь примерно три часа - здесь же с наибольшей скоростью происходит и его разрушение под действием той же жесткой коротковолновой радиации Солнца [18]. В нижней стратосфере, куда озон попадает с нисходящими (довольно слабыми) потоками воздуха, радиация значительно меньше и

время его жизни более продолжительно (около 100 сут. для стратосферы полярных районов) [50].

1.2 Негативное влияние приземного озона на здоровье человека

Мы можем видеть, что стратосферный озон является нашим защитником, но у поверхности земли озон может быть крайне опасен для человека и не только [6]. Итак, теперь поговорим о приземном озоне, которому уделено ключевое внимание в данной работе. Как уже говорилось выше, Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) внесла приземный озон в пятерку основных соединений, концентрации которых в приземном слое атмосферы необходимо определять для оценки качества воздуха (кроме озона, сюда входят также взвешенные вещества, диоксид азота, монооксид углерода и диоксид серы) [46]. Опасность озона для человека весьма велика, потому что Всемирная организация здравоохранения вводит определенные нормы концентраций озона (Рис. 4.). Фоновые концентрации приземного озона могут изменяться в зависимости от времени и места, но они могут составлять около 8 мкг/м³. По мере увеличения концентрации озона выше рекомендуемого норматива его влияния на здоровье человека может проявляться все более часто и в более тяжелой форме [6]. Такой эффект может иметь место там, где концентрации приземного озона являются значительными и имеют антропогенное происхождение или повышаются во время аномально жаркой погоды. Также, согласно таблице (Рис. 4), усредненное за 8 часов значение установлено на уровне 160 мкг/м³, при котором в ходе контролируемых тестов, проводимых в помещениях, при участии здоровых молодых взрослых людей, время от времени выполняющих упражнения, отмечались измеряемые и преходящие нарушения функции легких, а также воспалительные процессы в легких [4]. Аналогичные последствия наблюдались в ходе исследований в летних лагерях, в которых принимали участие выполняющие упражнения дети [5,6]. Хотя по мнению некоторых, подобные реакции не обязательно могут оказаться неблагоприятными и что они проявлялись лишь при выполнении интенсивных упражнений, этому можно противопоставить то соображение,

что имеется значительное число лиц из населения в целом, которые могут оказаться более восприимчивыми к воздействию озона, чем сравнительно молодые и в целом здоровые лица, которые приняли участие в исследовании, проводимом в закрытых помещениях [3]. Кроме того, исследования в закрытых помещениях дают мало информации в отношении повторных экспозиций. Данные по временным рядам позволяют сделать вывод о том, что экспозиция при уровне ПП-1 обуславливает прирост вызываемых озоном смертных случаев на 3-5% [46].

При усредненной за 8 часов концентрации, превышающей 240 мкг/м³, озон может иметь существенные последствия для здоровья. Данный вывод сделан на основе результатов большого числа исследований по ингаляции озона в клинических условиях, а также исследований на открытом воздухе [3]. Как здоровые взрослые люди, так и лица, страдающие астмой, испытывают значительные затруднения дыхания, а также воспаление дыхательных путей, характеризуемых симптомами, и нарушения функции легких. Кроме того, существует обеспокоенность по поводу увеличения смертности, связанной с респираторными проблемами у детей. Согласно данным исследований временного ряда, экспозиция к озону в подобной концентрации обуславливает рост числа смертных случаев, вызываемых озоном, на 5-9% по сравнению со смертностью при экспозиции на расчетном фоновом уровне [46].

	Ежедневное максимальное усредненное за 8 часов значение (мкг/м ³)	Что послужило основой при установлении данного уровня
Высокие концентрации	240	Наносит значительный ущерб здоровью; оказывает влияние на значительную долю уязвимой части населения.
Промежуточный показатель 1 (ПП-1)	160	Значительное влияние на здоровье; показатель не обеспечивает надлежащей защиты здоровья населения. Экспозиция к данному уровню содержания озона обуславливает: • Физиологические и воспалительные изменения в легких у здоровых молодых людей, совершающих физические упражнения в течение 6,6 часов; • Отрицательное влияние на здоровье детей (по результатам различных исследований, проводимых в летних лагерях, где дети подвергались воздействию озона, находящегося в атмосферном воздухе). • Примерное увеличение ежедневной смертности на 3-5%^a (по результатам исследований временного ряда).
Норматив ВОЗ по озону	100	Обеспечивает необходимую охрану здоровья, хотя и на этом уровне могут проявляться определенные последствия. Экспозиция к данному уровню содержания озона обуславливает: • Увеличение ежедневной смертности^a на 1-2% (по результатам исследований временного ряда). • Экстраполяция данных исследований в закрытых помещениях и на открытых пространствах на основе вероятности того, что экспозиция в реальной жизни имеет повторяющийся характер и что в исследованиях, касающихся закрытых помещений, не принимаются во внимание высокочувствительные или находящиеся под клиническим наблюдением индивидуумы или дети. • Вероятность того, что находящийся в окружающем воздухе озон является маркером соответствующих оксидантов.

^a Смертные случаи, ассоциируемые с озоном. Исследования временного ряда указывают на увеличение ежедневной смертности в диапазоне 0,3-0,5% на каждые 10 мкг/м³ прироста концентрации в усредненной за 8 часов концентрации выше расчетного базисного уровня 70 мкг/м³.

Рис. 4 Нормативы ВОЗ и промежуточные показатели в отношении озона: концентрация за 8 часов [46].

Раньше думали, что проблема загрязнения приземного воздуха озоном характерна только для крупных городов [1], но проведенные позже исследования показали, что достаточно высокие и опасные для человека

концентрации приемного озона могут наблюдаться в удаленных и малоурбанизированных районах [1].

Изучение приземного озона началось достаточно давно, в США интенсивные исследования по оценке негативного влияния приземного озона на здоровье человека начались в 1952 г. [2]. Когда были получены первые результаты, демонстрирующие исключительные токсические свойства озона, в США под лозунгом «Здоровье человека любой ценой» была развернута широкомасштабная государственная программа по снижению негативного влияния приземного озона на здоровье населения. В развитых странах Европы также были активизированы работы в этом направлении. Были проведены многочисленные исследования в этой области и получены результаты, показывающие важность приземного озона как опасного загрязнителя [2,3,4].

В работе D.V. Bates [2] отмечается, что влияние приземного озона на здоровье населения настолько хорошо изучено за рубежом, что по количеству вызовов скорой медицинской помощи можно косвенно определять концентрации озона в воздухе. Этот же автор на основании многочисленных исследований показал, что увеличение концентрации озона на ~ 20 мкг/м³ приводит к увеличению смертности на $\sim 0,64\%$ от сердечно-сосудистых заболеваний и заболеваний органов дыхания, а в исследованиях [3] авторы получили увеличение смертности в результате сердечно-сосудистых заболеваний от озона на $\sim 0,45\%$ при увеличении его часовых концентраций на ~ 10 мкг/м³. Авторы [4] определили, что при высокой температуре воздуха и повышенных концентрациях озона наблюдается усиление отрицательного воздействия каждого фактора на здоровье населения, т.е. синергизм температуры воздуха и озона. В обширном исследовании [5] отмечается, что озон оказывает негативное воздействие на здоровье человека независимо от других загрязнителей воздуха. В этой работе приводятся и подробные методики для расчета доз озона.

Установлено, что среднедневная (среднее за 8 ч. светлого времени) концентрация приземного озона величиной 70 мкг/м³ уже оказывает негативное влияние на здоровье человека и приводит к увеличению дополнительной смертности на ~0,6 %. Многочисленные исследования продемонстрировали сильную связь кратковременных (1 час и 8 часов) отрицательных воздействий озона на здоровье и увеличение дополнительной смертности от сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний. Например, среднедневные концентрации озона, превышающие величину 100 мкг/м², в Англии приводят к дополнительной смертности и дополнительным госпитализациям, связанным с респираторными заболеваниями. Этот эффект наблюдается летом и не зависит от других загрязняющих веществ. Благоприятные уровни и пороговые значения для хронического воздействия озона не известны [5]. Последние исследования также подтверждают независимое от других загрязнителей отрицательное влияние озона на здоровье. Причем установлено, что воздействие озона приводит к повреждению коронарных сосудов, атеросклерозу и инфаркту, увеличению размера атеросклеротических бляшек, а также усиливает проявления ишемических заболеваний. Ингаляция озоном животных приводила также к нарушению электрофизиологических показателей сердечной деятельности [6].

В связи с изменениями глобального климата в России увеличивается количество и амплитуда волн тепла, что приводит к возникновению катастрофических концентраций приземного озона в загрязненной атмосфере [7]. Летом 2010 г. в Московском регионе отмечались очень большие по величине концентрации приземного озона [7,8]. Среднечасовые концентрации озона в атмосфере столицы в летние месяцы превышали значения 450 мкг/м³, а в г. Зеленоград и Звенигород были более 500 мкг/м³. Летом 2010 г. на территории России смертность за июль-август, когда наблюдалась аномально сильная жара, по сравнению с аналогичным

периодом за 2009 г. увеличилась на 57,8 тыс. случаев, причем в некоторых регионах (Москва, Поволжье) смертность возросла в 1,5-1,6 раза. В наибольшей степени возросло число случаев смерти от сердечно сосудистых заболеваний и от заболеваний органов дыхания [9,10]

Отметим, что если в России 58 тыс. дополнительных случаев смертей зарегистрированы среди 60 млн. населения, то в Европе, вовремя аномально жаркой погоды в 2003 г., ненамного большее число – 70 тыс. среди значительно большего населения – 330 млн. жителей 7 европейских стран. Отчасти более низкую относительную смертность в странах Европы можно объяснить за счет действия мероприятий по контролю за ситуацией и своевременному информированию населения. В частности, в США правительство на специальном сайте [11] каждый день информирует своих граждан о качестве атмосферного воздуха. Также организовано информирование населения и в странах Евросоюза [12]. Например, в Германии оперативная информация о концентрациях приземного озона доступна в аптеках и жители знают, как правильно ею пользоваться.

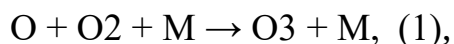
Повешению концентраций озона в атмосферном воздухе могут способствовать следующие метеорологические ситуации [7]:

1. малоподвижная (застойная) барическая ситуация (обычно – область высокого давления со слабым ветром на уровне 925 гПа – не более 4 м/с);
2. усиленное накопление предшественников озона в пограничном слое атмосферы (ПСА) (из-за позднего разрушения ночной инверсии) и их слабое дневное рассеяние в высоту (из-за пониженного вертикального градиента температуры);

3. уменьшенная скорость сухого осаждения на земную поверхность (благодаря ее сухости при максимальных суточных температурах 28 °С и выше);
4. увеличенные эмиссии ЛОС (обусловленные высокими температурами воздуха, в т.ч., особенно, при пожарах).

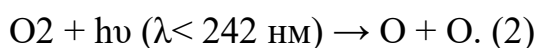
1.3 Процессы образования приземного озона

Существует единственная реакция прямого образования озона в атмосфере [47]:



где М – какая-либо третья молекула.

Эта реакция имеет в атмосфере очень высокую скорость из-за высоких концентрация O_2 и М, поэтому локальная продукция фактически определяется скоростью образования атомарного кислорода О [48]. Как уже говорилось выше в стратосфере атомарный кислород образуется по следующей реакции [47]:



Основное фотохимическое образование озона по этой схеме идет, главным образом, на высотах выше 20 км, поскольку свет с длиной волны $\lambda < 242$ нм ниже практически не проникает (Рис. 5).

Стратосферный озон может попадать в тропосферу за счет стратосферно-тропосферного обмена, это явление в настоящее время плотно изучается [49]. Известно, что случаи глубоких стратосферных вторжений в тропосферу [13,14] иногда приводят к существенному повышению концентраций озона в тропосфере, причем на широтах южнее 50 ос.ш. в теплую и сухую погоду, начиная с весны, такие вторжения могут вызвать повышение приземных концентраций озона до уровней, превышающих предельно допустимые концентрации (ПДК), опасные для здоровья [15].

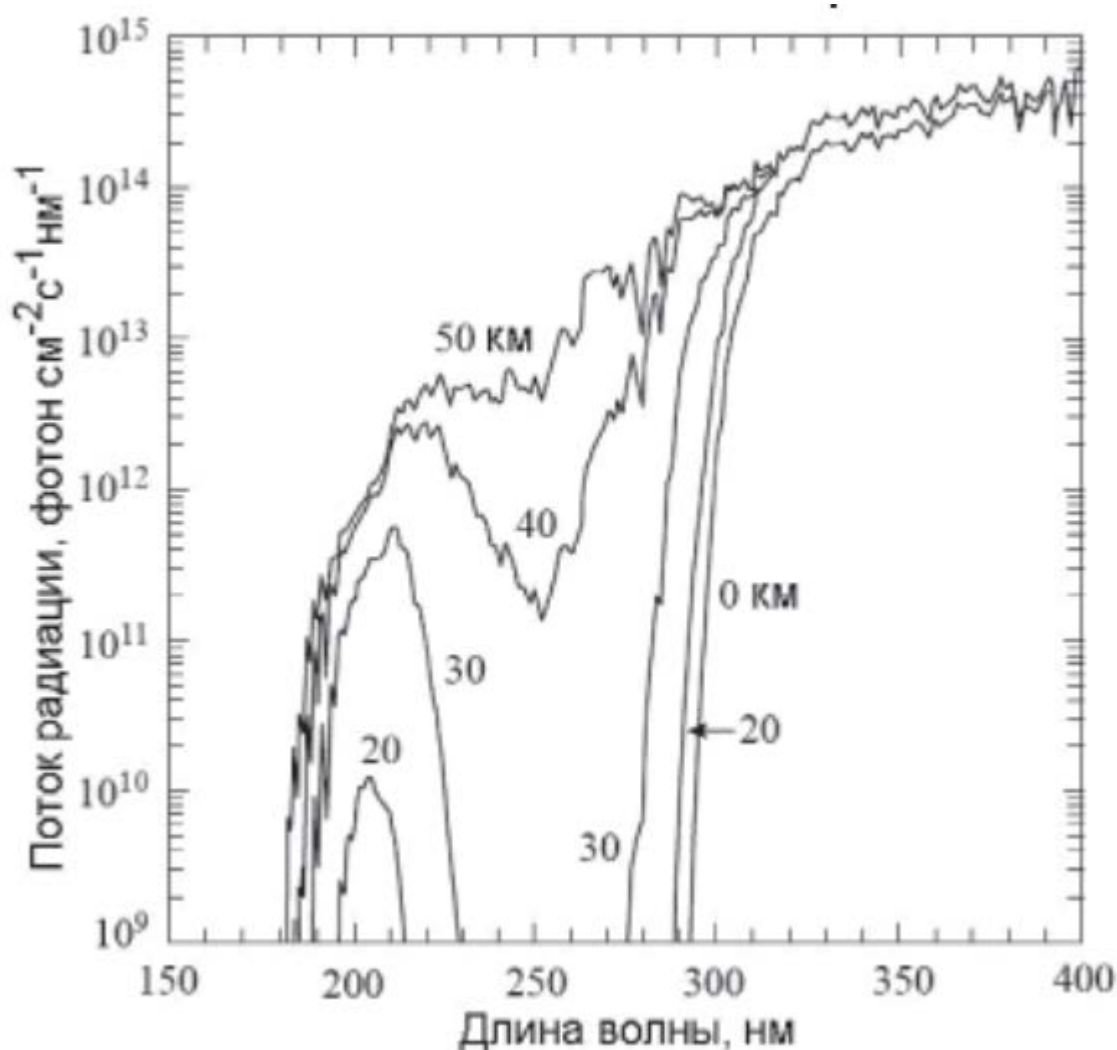
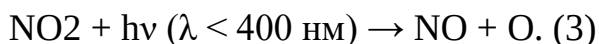


Рис 5. Спектральная интенсивность потока солнечного излучения на различных высотах [48].

В настоящее время считается общепризнанным, что содержание озона в тропосфере контролируется двумя процессами – притоком из стратосферы и фотохимической генерацией в тропосфере, – причем их эффективность в различных широтах, на различных высотах и в различное время суток может значительно различаться [50].

Фотохимическое образование приземного озона происходит через сложную систему реакций с обязательным участием оксидов азота (оксида NO и

диоксида NO₂) [47]; их совокупность обычно обозначают общей формулой NO_x. Образование атомарного кислорода происходит по реакции:

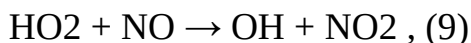
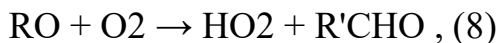
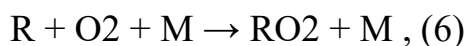
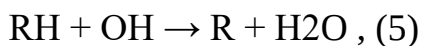


С последующим образованием озона по реакции (1). Вместе с тем, образуемая в реакции (3) окись азота NO может разрушать озон в результате реакции



Смещение равновесия между реакциями (3) и (4) может произойти в сторону увеличения продукции атомарного кислорода, а, следовательно, и озона, в результате образования двуокиси азота отличным от реакции (4) способом и в сторону разрушения озона при дополнительных выбросах окиси азота NO. Кроме того, реакция (3) разрушения приземного озона может происходить и в ночное время, при условии наличия источников NO.

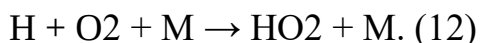
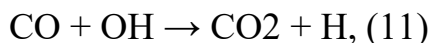
Цикл реакций (3)-(4) может не обеспечить постоянного и значительного роста концентрации озона, наблюдаемого в загрязненной атмосфере, при отсутствии там непосредственных и достаточно мощных источников диоксида азота. Однако если существует постоянно действующий механизм преобразования оксида азота в диоксид в превращениях, где расходуются другие компоненты атмосферы, то озон мог бы нарабатываться в реакциях (3) и (1). Такой механизм возможен при участии летучих органических соединений (ЛОС – в англоязычной литературе для них общеупотребительно сокращение – VOC) и/или оксида углерода (CO) [1]. Именно по такой схеме образуется фотохимический смог. Последовательность химических реакций была первоначально предложена HaagenSmit (1952) [51], исследовавшим причины фотохимического загрязнения воздуха в Лос-Анжелесе, США, которое впервые было зарегистрировано еще в 1940-е гг. Основной в схеме является последовательность реакций (R и R' обозначают углеводородные радикалы)



в результате которых NO окисляется до NO₂, после чего становятся возможными реакции (3) и (1). В результирующем виде эту последовательность реакций можно записать следующим образом:



Озон образуется и при окислении метана CH₄ по последовательности реакций (5)- (10), в которой в качестве R выступает CH₃ [15]. Потенциал образования озона в отдельной реакции в этом случае невелик ввиду медленности реакции OH + CH₄, но ввиду большого объема эмиссии метана в атмосферу, метан обеспечивает около 20% глобального фотохимического образования озона в тропосфере [16]. В случае образования озона из монооксида углерода вместо реакций (5-9) происходят следующие реакции:

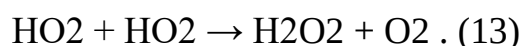


И далее реакции (9), (3) и (1).

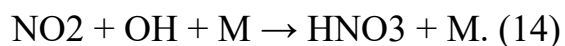
Такой механизм фотохимического образования озона является основным в отдаленных районах, где антропогенные загрязнения сравнительно невелики, в частности, над океанами [15,16]. Необходимый для протекания последовательности реакций (5)-(12) радикал OH образуется при реакции водяного пара с энергетизированным атомарным кислородом (O(1D)) [52].

В загрязненной атмосфере фотохимическое образование озона идет через последовательность реакций (5)-(9). Накопление озона зависит от

соотношения исходных концентраций органических соединений – предшественников пероксидных радикалов – и оксидов азота. При малых концентрациях NO_x пероксидные радикалы вместо реакции с NO могут реагировать между собой, производя пероксиды и другие кислородосодержащие соединения. В частности, в чистой тропосфере вне промышленных районов наиболее важным процессом является саморазрушение HO₂ в реакции, приводящей к образованию пероксида водорода [53]:



Пероксид водорода H₂O₂ очень хорошо растворим в воде, вымывается дождем и является весьма сильным окислителем, так что, по-видимому, играет важную роль в процессах окисления, протекающих в жидкокапельной фазе атмосферы. При высокой величине соотношения NO_x и углеводородов доминирующим стоком HO₂ радикалов может стать реакция окисления NO₂ гидроксильным радикалом, приводящая к образованию паров азотной кислоты [53]:



Как и пероксид водорода, пар азотной кислоты легко растворим в воде и эффективно вымывается из атмосферы дождем [53].

В стационарном режиме скорости образования OH по реакции (9) и гибели по реакции (5) должны быть равны. Предельный случай низких концентраций NO_x (0.3-2 млрд⁻¹; такие концентрации наблюдаются в фоновых районах), когда скорость реакции (13) намного превышает скорость реакции (14), принято называть азотно–ограниченным режимом фотохимического образования озона [18]. Предельный случай высоких концентраций NO_x (>4 млрд⁻¹; такие концентрации характерны для урбанизированных регионов), когда скорость реакции (13) намного ниже скорости реакции (14), принято называть углеводородно–ограниченным (CH

– ограниченном) или NO_x –насыщенным режимом фотохимического образования озона [18]. Некоторое представление о зависимости концентраций фотохимически образуемого озона в зависимости от скоростей эмиссии его предвестников можно получить из рис. 6. На данном графике толстая линия разделяет NO_x –ограниченный (слева вверху) и углеводородно–ограниченный (справа внизу) режимы фотохимического образования озона [18].

Из рис. 6 видно, что в достаточно сложной зависимости количества фотохимически образующегося озона от эмиссий оксидов азота и летучих органических соединений условно можно выделить две области (на рисунке они разделены толстой наклонной кривой). В одной из областей (на рисунке вверху слева от разделительной линии) уровень озона пропорционален уровню оксидов азота и практически не зависит от уровня углеводородов. В другой области (внизу справа от разделительной линии) уровень озона пропорционален уровню углеводородов, а при увеличении содержания оксидов азота уровень озона падает.

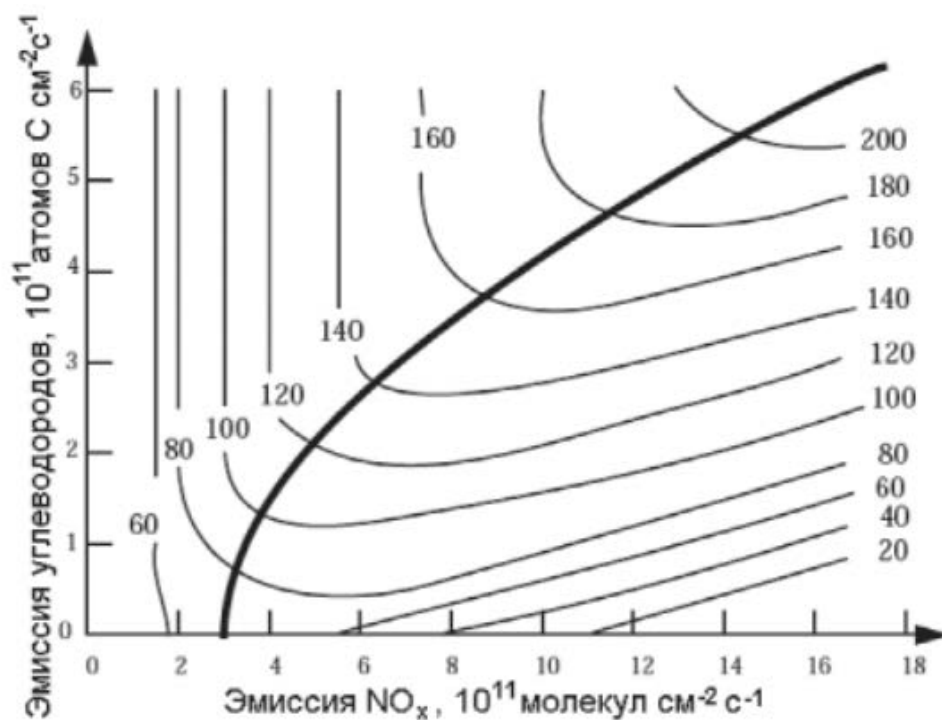


Рис. 6. - Модельные величины отношения смеси фотохимически образующегося озона (млрд^{-1}) в зависимости от эмиссий оксидов азота и летучих органических соединений [18].

На урбанизированных территориях характерное время изменения концентрации озона после разового антропогенного выброса окислов азота (в большинстве случаев, в основном в результате реакции (4)) составляет несколько минут, заметное фотохимическое образование озона в результате реакций (3)-(12) происходит за несколько часов. Поэтому, как правило, в центре крупных населенных пунктов преобладает разрушение озона по реакции (4) и его концентрации меньше, чем на их окраинах и в окрестностях: даже при слабых ветрах ~ 2 м/с наибольшие концентрации озона наблюдаются с подветренной стороны от населенных пунктов на расстоянии несколько десятков километров [19].

2. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения особенностей распределения приземного озона над территорией Российской Федерации и выделения зон его повышенного содержания использовались данные реанализа ERA-5. Для оценки степени влияния атмосферного переноса на содержание приземного озона использовалась траекторная модель, позволяющая на основе измеренных метеорологических параметров (скоростей ветра, температуры и давления) рассчитать перенос озона в областях его отмеченных повышенных концентраций.

2.1 Траекторная модель HYSPLIT

2.1.1 Общие сведения о модели

Модель гибридной одночастичной лагранжевой комплексной траектории (HYSPLIT) национальной лаборатории океанических и атмосферных исследований (NOAA) – это комплексная система для вычисления простых траекторий воздушных масс, а также сложного переноса, дисперсии, химического превращения и моделирования осаждения. HYSPLIT продолжает оставаться одной из наиболее широко используемых моделей атмосферного переноса и рассеяния в сообществе людей, занимающихся изучением атмосферы. Одним из наиболее распространённых способов применения данной модели является анализ обратных траекторий для определения происхождения воздушных масс и установления отношений источник-рецептор. HYSPLIT также используется в различных симуляциях, описывающих атмосферный перенос, рассеивание и осаждение загрязняющих веществ и опасных материалов. Некоторые примеры применений данной модели включают в себя отслеживание и прогнозирование выброса радиоактивного материала [20,21,22], дыма от пожаров [23], переносимой ветром пыли [24,25] алерганов (веществ,

вызывающих аллергию, к ним относятся белки, белково-полисахаридные и белково-липидные комплексы, полисахариды и неорганические вещества, в том числе химические элементы) [26,27], вулканического пепла [26]., а также анализа загрязнения из различных мобильных и стационарных источников [28]. (таблица 1)

Таблица 1 Примеры исследований с использованием HYSPLIT для расчета переноса и дисперсии

Применение	Местоположение	Краткое описание	Ссылки
Радиоактивные вещества	Маршалловы острова (центральная часть Тихого океана), полигон в Неваде (США), Семипалатинский ядерный полигон (Казахстан)	Отложение радиоактивных осадков после ядерных испытаний	Moroz и др. (2010)
	АЭС AREVA NC La Hague (северо-запад Франции)	Концентрация криптона в воздухе	Connan и др. (2013)
	Фукусима и соседние префектуры (Япония)	Анализ переноса и дисперсии воздушной массы для интерпретации измерений йода, теллура и цезия	Kinoshita и др. (2011)
	80 км вокруг реактора Фукусима (Япония)	Временное изменение траектории шлейфа, концентрации, осаднения и дозы облучения цезия-137	Challa и др. (2012)
	Глобальный масштаб	Перенос, дисперсия и осаднение ксенона-133	Bowyer и др. (2013)
	Столичная область Сеула, Южная Корея	Оценка радиологической опасности, связанной с терроризмом	H. Jeong и др. (2013)

	Фукусима (Япония) и глобальный масштаб	Выбросы, транспорт, дисперсия и осаждение цезия-137, йода-131	Draxler и Rolph (2012); Draxler и др. (2013)
	Испытательный полигон в Неваде	Дисперсия после ядерного испытания	Rolph и др. (2014)
Лесные пожары	Континентальная часть США	Система прогнозирования дыма Национальной метеорологической службы США	Rolph и др. (2009)
Переносимая ветром пыль	Северная Африка и Испания	Перенос пыли из пустыни Сахара	Escudero и др. (2006, 2011)
	Австралия	Прогноз пылевой бури 22–24 октября 2002 г.	Wain и др. (2006)
	Саудовская Аравия, Ирак, Сирия, Иордания и Иран	Выбросы, перенос, рассеивание и отложение пыли над Ираном	Ashrafi и др. (2014)
	Северная Африка и южная Испания	Прогноз переноса пыли на 2008 и 2009 годы	Stein и др. (2011)
	Глобальный масштаб	Использование двух схем выбросов пыли и глобальной модели Эйлера (GEM), для моделирования глобального распределения пыли в 2008 году	Wang и др. (2011)
	Патагония (Аргентина) и субантарктический Атлантический океан	Анализ пылевой бури, достигающей Антарктиды	Gasso и Stein (2007)
	Пустыни Пуна – Альтиплано (Боливия) и юг Южной Америки	Оценка и сравнение со спутниковыми данными переноса, рассеивания и осаждения пыли	Gaiero и др. (2013)
Загрязнители воздуха	Миссисипи, побережье Мексиканского залива (США)	Мезомасштабный перенос загрязнителей воздуха из точечных источников / моделирование диоксида серы и оксидов азота	Challa и др. (2008)/ Yerramilli и др.

			(2012)
	Великие Озера (США)	Перенос и осаждение ртути и диоксинов	Cohen и др. (2002, 2004, 2011, 2013)
	Хьюстон, Техас (США)	Перенос и дисперсия бензола	Stein и др. (2007)
	Уэльва (Испания) Чен и соавт. (2013)	Транспорт и дисперсия мышьяка в виде частиц	Chen et и др. (2013)
Аллергены	Восток США	Эмиссия и перенос пыльцы	Efstathiou и др. (2011)
	Центральная и северная часть США	Эмиссия и перенос пыльцы	Pasken и Pietrowicz (2005)
Вулканический пепел	Северная Америка	Прогноз переноса пепла	Stunder и др. (2007)

Метод расчета модели представляет собой гибрид лагранжевого подхода (использует движущуюся систему отсчета для расчетов адвекции и диффузии при перемещении траекторий или воздушных траекторий от их первоначального местоположения), и методологии Эйлера, которая использует фиксированную трехмерную сетку как систему отсчета для вычисления концентраций загрязняющих веществ в воздухе (название модели, первоначально отражало этот гибридный вычислительный подход). Модель HYSPLIT развивалась на протяжении более 30 лет, от оценки упрощенных единичных траекторий на основе наблюдений с помощью радиозондов до системы учета множественных взаимодействующих загрязнителей переносимых, рассеянных и депонированных в локальном и глобальном масштабах.

2.1.2 История модели HYSPLIT.

Историю данной модели можно проследить, начиная с 1949 года, тогда Секция специальных проектов (Special Project Section (SPS)) (предшественник ARL) и Бюро погоды США [теперь Национальная служба погоды (NWS) NOAA)] попытались найти источник радиоактивного загрязнения, возникшего в результате первого советского атомного испытания и обнаруженного разведывательным самолетом возле Камчатского полуострова. Для этой цели вручную были рассчитаны обратные траектории, использовались данные о ветре, полученные на основе зондирования атмосферы два раза в день. Эти траектории находились на высоте 500 гПа, и учитывали геострофический ветер. Хотя эти обратные траектории были рассчитаны более 60 лет назад, процентная ошибка между рассчитанным и фактическим местоположением источника относительно пройденного траекториями расстояния, была удивительно мала (около 5%). С тех пор расчеты траекторий стали одной из основ исследовательской деятельности ARL.

В середине 60-х Пасквиль (Pasquill) и Гиффорд (Gifford) представили оценку горизонтального и вертикального стандартного отклонения непрерывного распределения концентрации плюма (конвективных струй, вызванных силой плавучести), что и послужило основой для построения так называемых гауссовых моделей дисперсии. Одна такая модель была разработана в ARL в 1966, на основе данных известного проекта Prairie Grass (эксперимента по дисперсии, проведенного в пограничном слое атмосферы вблизи О'Нил, штат Небраска летом 1956 года). Используя гауссовский подход и предполагая, что атмосфера имеет устойчивое состояние, с однородной и стационарной турбулентностью, концентрации воздуха были оценены на основе данных о ветре, собранных на одном участке. Продолжая эту работу в конце 1960-х и начале 1970-х годов для обработки более реалистичных (изменяющихся) погодных условий, ученые ARL разработали модель мезомасштабной

диффузии (MESODIFF) из-за серьезной озабоченности по поводу здоровья и безопасности, связанной с запланированными или случайными выбросами радиоактивных материалов в атмосферу на национальной станции по испытанию реакторов (NRTS) в Айдахо. В этой сегментированной гауссовой модели, для учета пространственной изменчивости горизонтального потока ветра у поверхности, использовались сеточные данные, интерполированные из показаний 21 датчика ветра установленного, на башне, находящейся на территории NRTS. Моделирование использовало максимум 400 выбросов и включало изменяющиеся по времени скорости диффузии. Подобный подход использовался в середине 1970-х годов, когда исследователи ARL объединили траектории с моделью гауссового шлейфа для расчета концентраций в воздухе газообразных или твердых частиц, непрерывно выпускаемых из однородного точечного источника на основе данных, полученных с помощью радиозонда.

Все эти исследования создали хорошую основу для разработки HYSPLIT версии 1 (HYSPLIT1) в начале 1980-х годов. В этой первоначальной версии модели рассматривались траектории за несколько дней, и считалось, что источник сегментированных выбросов загрязняющих веществ находится вблизи земной поверхности. Перемещение было рассчитано из наблюдений ветра, основанных на необработанных (не интерполированных) данных, взятых два раза в день. Предположения включали отсутствие вертикального перемешивания ночью и полное перемешивание по планетарному пограничному слою (ППС) в течение дня. Ночные сдвиги ветра моделировались путем вертикального разбиения выбросов, распространявшихся по всему ППС, на 300 метровые во время фазы переноса в ночное время расчета. Модель была использована для имитации перемещения выпущенного в атмосферу Криптона ($Kr-85$), и отобранного на нескольких участках на Среднем Западе США во время 2х-месячного полевого эксперимента. Позже, HYSPLIT версии 2 (HYSPLIT2), для оценки коэффициентов вертикального смешения, которое варьировались в

пространстве и времени, включал в себя использование интерполированных и необработанных данных с радиозонда или любых других доступных данных измерений. Эта модельная версия была применена для моделирования в так называемом Cross Appalachian Tracer Experiment (CAPTEX). До начала 1990-х годов HYSPLIT использовал только необработанные наблюдения с очень ограниченным пространственным (около 400 км) и временным (около 12 ч) разрешением для расчета переноса и дисперсии. HYSPLIT3 позволял рассчитывать траектории, а также перенос и рассеивание загрязняющих веществ, с использованием цилиндрических выбросов, которые растут во времени и разделяются при достижении размера, соизмеримого с сеткой метеорологических данных. Также, эта версия была применена для имитации эксперимента по трассировке в Северной Америке (ANATEX).

Позже в систему моделирования HYSPLIT были включены различные химические взаимодействия, такие как образование и отложение сульфата (SO_4^{2-}) и другие. В HYSPLIT3 химические превращения происходили только внутри каждого лагранжевого выброса, без какого-либо взаимодействия с другими выбросами. В рамках более широких исследований кислотных осадков модель применялась на востоке Соединенных Штатов в 1989 году, где сравнивалась с наблюдаемыми сезонными и годовыми закономерностями концентраций SO_2 и (SO_4^{2-}) в воздухе, также исследовалось выпадение и осаждение (SO_4^{2-}) из осадков. Также HYSPLIT3 использовался для моделирования атмосферного состояния при переносе полуплетучих загрязняющих веществ с использованием алгоритма динамического разделения пара и частиц, включающего химические превращения, инициируемые гидроксильным радикалом (OH) и фотолизом. HYSPLIT-SV (SV (semivolatile - полуплетучие)) использовался для оценки переноса и осаждения полихлорированных дибензо-*p*-диоксинов и полихлорированных дибензофуранов в Великие озера, включая оценку детальных отношений

источник-рецептор. Кроме того, HYSPLIT-SV использовался для получения результатов источник-рецептор для переноса атразина и осаждения в Великие озера и другие чувствительные экосистемы.

К концу 1990-х годов многие новые функции были включены в HYSPLIT версии 4 (HYSPLIT4), ставший основой для текущих версий моделей. Дополнения включают в себя автоматизированный метод последовательного использования нескольких метеорологических сеток, идущих от более точного к более грубому горизонтальному разрешению, и вычисление скорости рассеивания по вертикальному профилю диффузии, сдвигу ветра и горизонтальной деформации поля ветра. HYSPLIT4 позволяет использовать различные виды лагранжевых представлений о переносимых воздушных массах: трехмерные (3D) частицы, выбросы или их гибрид. Трехмерная «частица» в данной версии является точечной вычислительной массой, представляющей газообразный или дисперсный фазовый загрязнитель, перемещаемый полем ветра со средним и случайным компонентом. Отдельные трехмерные частицы не растут и не расщепляются, но необходимо выпустить достаточное количество, чтобы представить горизонтальное и вертикальное распределение загрязнителя. С другой стороны, одиночный выброс представляет собой распределение большого количества трехмерных частиц, допуская предопределенное распределение концентрации (гауссовое или цилиндрическое) в вертикальном и горизонтальном направлениях. Они растут по горизонтали и вертикали в соответствии с алгоритмами дисперсии для выбросов, что эквивалентно эволюционному распределению частиц в сопоставимом трехмерном расчете. Кроме того, выбросы разделяются, если они становятся слишком большими, чтобы имелась возможность представить их одной метеорологической точкой данных. Для избежания ситуаций, когда число выбросов быстро достигает пределов вычислительного массива, одновременные выбросы, занимающие одно и то же местоположение, могут быть объединены. Альтернативный подход состоит в том, чтобы моделировать дисперсию с

помощью двумерного объекта (плоская масса, имеющая нулевую вертикальную протяженность), где загрязняющее вещество имеет распределение выбросов в горизонтальном направлении, растущее в соответствии с правилами дисперсии и расщепления для выбросов. Однако по вертикали выбросы рассматриваются как совокупность лагранжевых частиц. Эта опция позволяет модели представлять более сложную вертикальную структуру атмосферы с более высокой точностью воспроизведения, в то же время представляя более однородную горизонтальную структуру.

Версия 4 HYSPLIT была основой для практически всех версий данной модели за последние 15 лет. Эта версия использовалась при эксперименте под названием ANATEX, также она применялась для оценки осаждения радиоактивных веществ в результате аварии на Чернобыльской АЭС (2001) и для моделирования извержения вулкана в Рабауле. В начале 2000-х годов приложения к данной модели начали включать модули химического преобразования для моделирования озона (O_3) в нижней тропосфере. В целом включение нелинейных химических процессов в модель, использующую подход Лагранжа, такую как HYSPLIT, представляет собой сложную задачу, поскольку не существует простого подхода для оценки химических взаимодействий, которые могут происходить между лагранжевыми частицами или выбросами. Обычный подход заключается в том, что мы используем методологию Лагранжа для расчета переноса, дисперсии и осаждения, а подход Эйлера для представления химических превращений различных частиц.

Более обобщенный модуль химии был включен в HYSPLIT (HYSPLIT Chem) для расчета пространственного и временного распределения различных фотохимических примесей в нижней тропосфере в региональном масштабе. При использовании трехмерных частиц перенос и дисперсию вычисляли с помощью метеорологических полей, используя мезомасштабную модель

(например, модель Национального центра атмосферных исследований (MM5)). После того как концентрации всех химических веществ были рассчитаны по регулярной эйлеровой сетке путем суммирования масс частиц в каждой ячейке, для моделирования химических превращений использовался механизм Carbon Bond IV. Результирующие концентрации в процессе химической эволюции каждой молекулы были перераспределены как изменение массы каждой частицы внутри группы. Предполагалось, что отношение конечной концентрации к начальной равно отношению конечной массы к начальной для соответствующих примесей. HYSPLIT CheM был применен для моделирования концентрации озона в Пенсильвании для тематического исследования в 1996 году. Кроме того, это конкретное применение модели представляло собой первую реализацию подхода «частица в сетке», применяемого к прогнозу качества воздуха.

Примерно в то же время HYSPLIT-SV был обновлен до структуры HYSPLIT4 и использовался для оценки переноса и осаждения полихлорированных дибензо-п-диоксионов (PCDD) в Великие озера, а затем для оценки состояния нефтяных пятен и переноса PCDD выделившегося в результате горения нефти на поверхности океана, после аварии на станции Deepwater Horizon. Кроме того, HYSPLIT-SV был расширен, для моделирования атмосферной ртути (HYSPLIT-Hg), путем добавления новых газофазных реакций и обработки водно-фазового равновесия и химического состава атмосферы. Концентрации реагентов с пространственно разрешенным разрешением (например, OH, SO₂) оценивали для каждого выброса на основе результатов внешней модели и алгоритмов, основанных на эмпирических данных. Основанная на выбросах версия HYSPLIT-Hg была использована для анализа переноса и осаждения ртути в Великие озера из американских и канадских источников, а также для оценки поведения и переноса выбросов ртути в Европе.

К концу 2000-х годов были включены новые функции выбросов, которые были более сложными, чем явный ввод скорости выбросов (то есть, сколько массы содержится каждой частице). Эти алгоритмы учитывают влияние метеорологических условий на выбросы. Этот подход был основан на расчете динамической скорости, а также использовал данные, полученные со спутника, подход был впервые применен для анализа переноса пыли по воздуху. Этот алгоритм был применен для оценки уровней пыли в Соединенных Штатах и также в глобальном масштабе. Второй алгоритм позволяет оценивать подъем шлейфа, используя условия плавучести, основанные на тепловыделении, скорости ветра и динамической скорости. Эта параметризация была применена для прогнозирования переноса и рассеивания дыма, возникающего в результате лесных пожаров, вблизи границ США, также на Аляске и Гавайях, и использовалась при моделировании выбросов в результате горения нефти на поверхности океана.

2.1.3 Модель HYSPLIT в последние годы

За последние 15 лет в HYSPLIT было добавлено множество обновлений, которые включают в себя самые последние достижения в расчете дисперсии и переноса. Здесь мы кратко рассмотрим основные, из них.

Недавно в качестве модуля системы моделирования HYSPLIT была включена глобальная модель Эйлера (GEM). В этом случае частицы или шлейфы сначала высвобождаются в лагранжевой структуре и переносятся в HYSPLIT до определенного времени, после чего их масса будет передана в глобальную модель Эйлера. В настоящее время глобальная Эйлерова модель может использоваться только с помощью глобальных метеорологических данных из глобальной системы прогнозов (Global Forecast System - GFS), Глобальной системы ассимиляции данных (Global Data Assimilation System - GDAS) или Национальных центров экологического прогнозирования (National Centers for Environmental Prediction - NCEP) - Национального центра реанализа моделей атмосферных исследований (National Center for Atmospheric Research -NCAR). (Таблица 2.).

Глобальная модель Эйлера включает в себя следующие процессы: адвекция, горизонтальное и вертикальное смешивание, сухое и влажное осаждение и радиоактивный распад. Одним из преимуществ этого подхода является то, что вблизи источников выбросов расчет с использованием подхода Лагранжа лучше отображает детали структуры шлейфа без первоначальной искусственной диффузии подхода Эйлера. Затем, когда особенности шлейфа больше не нуждаются в разрешении, масса частицы переносится в эйлерову структуру.

Модель	Горизонтальное разрешение	Временной период	Частота	Географический охват	Ссылки
NCEP/GDA S	1°	Дек. 2004 – настоящее время	3 часа	Мировой	Kanamitsu (1989)
NCEP/GDA S	0.5 °	Сен. 2007 - настоящее время	3 часа	Мировой	Kanamitsu (1989)
NCEP–NCAR reanalysis	2.5°	1948 - настоящее время	6 часов	Мировой	Kalnay и др. (1996)
NCEP/North American Mesoscale (NAM)	12 км	Июнь 2007 - настоящее время	3 часа	Континентальная часть США	Black (1994); Janjic (2003); Janjic и др. (2005)
NCEP/ Eta [the Eta Data and Assimilation System (EDAS)]	40 км	2004 - настоящее время	3 часа	Континентальная часть США	Black (1994)

NCEP/ Eta (EDAS)	80 км	1997 - 2003	3 часа	Континента- льная часть США	Black (1994)
NCEP/ Вложенная сеточная модель (NGM)	180 км	Янв. 1991 – Апр. 1997	2 часа	Континента- льная часть США	Philips (1979); Hoke и др. (1989)
NCEP/ Северо- американски й региональны й реанализ (NARR)	32 км	1979 - настояще е время	3 часа	Континента- льная часть США	Mesinger et al. (2006)

Таблица 2. Общедоступные файлы анализа метеорологических данных для запуска HYSPLIT

Методология расчета глобальной Эйлеровой модели в первую очередь нацелена на повышение вычислительной эффективности глобальных приложений переноса, особенно в ситуациях, когда шлейфы с меньшим радиусом действия могут взаимодействовать с полусферными или глобальными изменениями фона. В таких случаях одно моделирование может использоваться для эффективного моделирования глобального

переноса, дисперсии и осаждения, что было бы обременительным в вычислительном отношении с использованием одних только трехмерных частиц или шлейфов, учитывая их количество, которое потребуется для глобального охвата. В частности, этот подход очень эффективен при моделировании отдельных шлейфов от пыльных бурь, которые быстро сливаются в региональные или даже явления, затрагивающие все полушарие. Кроме того, недавно был расширен анализ ртути для оценки североамериканских источников, влияющих на район Великих озер, с использованием возможности глобальной модели Эйлера в рамках HYSPLIT для включения источников по всему миру.

Помимо переноса массы от выброса или частиц в глобальной Эйлеровой модели, HYSPLIT недавно включил опцию, позволяющую описать изменения лагранжиана между частицами и затылками во время процесса переноса в зависимости от их возраста (с момента выпуска); это называется смешанным подходом. Эта опция помогает избежать работы с большим количеством частиц, сохраняя при этом лучшее физическое описание явлений. Например, смешанный режим может быть выбран, чтобы использовать преимущества более точного представления подхода трехмерных частиц вблизи источника и информации о горизонтальном распределении, предоставляемой одним из подходов гибридного выброса на более дальних расстояниях переноса. В системе HYSPLIT доступны следующие параметры преобразования: 3D-частица, преобразующая в гауссовский горизонтальный слой и вертикальное распределение частиц (Gaussian horizontal puff and vertical particle distribution (Gh-Pv)), 3D-частица, преобразующаяся в горизонтальный слой и вертикальное распределение частиц (Top-hat horizontal puff and vertical particle distribution - TНh-Pv), Gh-Pv преобразование в трехмерную частицу, преобразование TНh-Pv в трехмерную частицу и преобразование трехмерной частицы или выброса (гауссовская или цилиндровая) в глобальной модели Эйлера. В целом, для

данного уровня вычислительного разрешения требуется меньше лагранжевых частиц / выбросов в рамках подхода смешанного режима.

Расчеты обратных траекторий были одними из наиболее привлекательных особенностей, с помощью которых HYSPLIT использовался во многих исследованиях. Хотя траектории предлагают простую оценку отношений источник-рецептор, одна траектория не может адекватно представлять турбулентные процессы смешивания, которые испытывают воздушные массы во время перемещения. Однако объединение процессов вычисления обратной траектории и лагранжевой дисперсионной составляющей может дать более реалистичное представление о связи между концентрациями в рецепторе и источниками, влияющими на него. С этой целью в систему моделирования HYSPLIT была включена адвекция в обратном времени с дисперсией путем простого применения дисперсионных уравнений к вычислению траектории частиц, движущихся против ветра. При таком подходе более широкое распределение лагранжевых частиц или шлейфов, высвобождаемых из рецептора, подвергающегося обратному переносу во времени и дисперсии, представляет географическую степень и силу потенциальных источников, влияющих на местоположение, представляющее интерес. Тем не менее, это конкретное применение модели должно удовлетворять различным критериям, то есть включать соответствующее представление взаимодействия между сдвигом ветра и вертикальной турбулентностью. С практической точки зрения вычислений выполнение обратных вычислений из нескольких точек рецептора более эффективно, чем прямые вычисления из множества потенциальных местоположений источника, чтобы найти наилучшее совпадение с данными рецептора даже при потере некоторой точности. Более точный прямой расчет можно использовать после определения меньшего набора местоположений источников.

Примеры использования методологии обратного лагранжевого дисперсионного моделирования HYSPLIT включают оценку источников ртути, воздействующих на штат Нью-Йорк, количественную оценку происхождения монооксида углерода и озон над Гонконгом и др. Кроме того, этот подход был принят в других приложениях, которые использовали HYSPLIT в качестве базовой модели для расчетов [например, модель стохастического инвертированного по времени лагранжевого переноса - Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT)].

HYSPLIT может использовать в своих расчетах самые разнообразные данные метеорологических моделей, начиная от мезомасштабных до глобальных. Вместо того, чтобы иметь другую версию HYSPLIT, чтобы справляться с изменениями переменных и структуры для каждого источника метеорологических данных, настраиваемый препроцессор используется для преобразования каждого источника метеорологических данных в HYSPLIT-совместимый формат. Таким образом, HYSPLIT можно легко запустить с одним или несколькими наборами метеорологических данных одновременно, используя оптимальные данные для каждой расчетной точки. В таблице 2 описаны некоторые метеорологические данные, уже отформатированные для HYSPLIT, являющиеся общедоступными, их можно загрузить с сайта - NOAA ARL (www.ready.noaa.gov/archives.php) и NOAA NCEP (<ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/hysplit/prod/>). Кроме того, мы также можем использовать следующие выходные данные для работы с HYSPLIT: модель исследования погоды и прогнозирования (Weather Research and Forecasting - WRF), Региональная система моделирования атмосферы (Regional Atmospheric Modeling System -RAMS), и промежуточный реанализ, проведенный Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts -ECMWF) (ERA-Interim).

Вычисление прямой и обратной траектории позволяет модели отображать воздушные потоки для интерпретации переноса загрязнителей в различных пространственных и временных диапазонах. Часто траектории используются для отслеживания истории воздушной массы, или для прогнозирования движения воздушной массы, а также для учета неопределенности в связанных моделях ветра. Группировка траекторий, которые имеют некоторые общие черты в пространстве и времени, упрощает их анализ и интерпретацию, а также уменьшает неопределенность в определении траекторий переноса в атмосфере.

После расчета перемещения интересующего нас образца потока, находящиеся рядом друг с другом траектории, могут быть объединены в группы, называемые кластерами. Различия между траекториями внутри кластера сведены к минимуму, а различия между кластерами максимальны. В вычислительном отношении траектории объединяются до тех пор, пока общая дисперсия отдельных траекторий относительно среднего значения кластера не начнет существенно увеличиваться. Это происходит, когда разрозненные кластеры объединяются.

Также в модель HYSPLIT была добавлена возможность использования ансамблей

Система моделирования HYSPLIT в настоящее время может работать на платформах ПК, Mac или Linux с использованием одного процессора. Для Mac и Linux доступны многопроцессорные вычисления, основанные на реализации интерфейса передачи сообщений (MPI). Система включает в себя набор программ предварительной и последующей обработки для создания входных данных, а также для визуализации и анализа результатов моделирования. Эти программы могут быть вызваны через графический интерфейс пользователя (GUI), или командную строку. Данную модель можно загрузить на компьютер с сайта www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php. Также существует версия модели, в которой нужно регистрироваться, она

добавляет возможность запуска модели с текущими (сегодняшними) прогнозными метеорологическими данными. Около 3000 зарегистрированных пользователей уже скачали HYSPLIT.

Еще один способ получить публичный доступ к метеорологическим данным и провести моделирование траектории и дисперсии с помощью HYSPLIT - это система отображения окружающей среды в реальном времени (READY), это веб-система, разработанная и поддерживаемая ARL. Система READY объединяет модель траектории и дисперсии, программы графического отображения и программы текстового прогнозирования в особенно простую и легкую в использовании форму. С момента первого запуска данной системы в 1997 году тысячи пользователей (около 80 000 запусков HYSPLIT в месяц) создавали продукты из READY для своих повседневных нужд и исследовательских проектов. Кроме того, был разработан специализированный веб-сайт, позволяющий прогнозистам запускать HYSPLIT для локальных событий (например, инцидентов с опасными материалами, лесных пожаров и ядерных аварий) и передавать результаты непосредственно штатным и местным руководителям по чрезвычайным ситуациям через настраиваемую веб-страницу.

Каждый год разработчики HYSPLIT предлагают учебные семинары по установке и использованию системы моделирования, для различных областей применения, например, извержения вулканов, радионуклидные аварии, пыльные бури, лесные пожары и различные эксперименты. Учебные материалы, в том числе самоучитель, доступны по адресу www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_workshop.php. Кроме того, существует форум для пользователей модели HYSPLIT, он используется для обсуждения вопросов, проблем и обмена опытом (<https://hysplitbbs.arl.noaa.gov/>). В настоящее время этим форумом пользуются более 2000 участников.

Одной из основных функций ARL является предоставление информации об атмосферном переносе и дисперсии различных веществ целью оценки

последствий выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, радиоактивных материалов и других потенциально вредных элементов.

Сейчас HYSPLIT предоставляет важную информацию о переносе и рассеивании вулканического пепла, данная информация используется в авиационной промышленности (www.ready.noaa.gov/READYVolcAsh.php). HYSPLIT в настоящее время находится в оперативном управлении NOAA / NWS для прогнозирования переноса и рассеивания вулканического пепла в зонах ответственности консультативных центров США по вулканическому пеплу (VAAC) и вблизи них (северная и центральная Америка). Метеорологи в VAAC и Бюро метеорологического слежения используют прогнозы HYSPLIT, для написания предупреждающих сообщений о вулканическом пепле и предупреждений о важной метеорологической информации (называемых SIGMET). Прогнозы дисперсии HYSPLIT публикуются в Интернете, например, в Авиационном метеорологическом центре NWS (<http://aviationweather.gov/iffdp/volc>). Также HYSPLIT принимает участие во взаимном сравнении моделей рассеивания между международными центрами, которые предоставляют консультативные услуги для авиации, для определения местонахождения источника вулкана и учет перемещения пепла по ветру с целью предупреждения авиации, а также моделирование VOG (смесь SO₂ и сульфата) на Гавайях (<http://mkwc.ifa.hawaii.edu/vmap/index.cgi>).

Кроме того, HYSPLIT использовался для оценки последствий выброса ядерного материала в атмосферу после землетрясения и цунами в марте 2011 года на атомной электростанции Фукусима.

Перенос дыма от лесных пожаров и его влияние на погоду был предметом интереса NOAA, по крайней мере, с середины прошлого века, а моделирование переноса дыма от крупных лесных пожаров было постоянной деятельностью ARL с 1998 года. Эти исследования в конечном итоге привели к появлению первых эксплуатационных прогнозов переноса дыма над континентальной частью США в 2007 году для прогноза качества воздуха

(www.arl.noaa.gov/smoke.php). Сегодня, в дополнение к континентальной части Соединенных Штатов, прогнозы дыма составляются для Аляски и Гавайских островов, они производятся ежедневно для предоставления прогнозистам данных о качестве воздуха и количестве в атмосфере твердых частиц с диаметром менее 2,5 мкм (PM_{2,5}) (<http://airquality.weather.gov/>).

Наконец, HYSPLIT совсем недавно был встроен в модель с WRF, которая использует более высокую временную частоту. Модель работает в архитектуре WRF с использованием того же пространственного и временного разрешения и была протестирована в эксперименте CAPTEX и других исследованиях с использованием трассировщиков. Это очень многообещающий подход для оценки влияния быстро меняющихся метеорологических условий, или сложной местности. Дальнейшая оценка этого подхода продолжается.

2.2 Данные реанализа ERA 5

В данной работе используются данные реанализа ERA 5, они находятся в открытом доступе, их можно загрузить на официальном сайте Европейской службы по борьбе с изменением климата (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>).

У данных реанализа есть некоторые преимущества, во-первых, такие данные достаточно легко получить, такие реанализы как ERA 5 абсолютно бесплатны, и могут быть загружены с различных сайтов. Во-вторых, данные реанализа имеют глобальный охват, поэтому на их основе мы можем получать наиболее подробные и полные карты интересующих нас параметров и характеристик.

Реоанализ ERA 5 – это один из множества продуктов, разработанных европейским центром среднесрочных прогнозов погоды ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). ECMWF одновременно является научно-исследовательским институтом и оперативной службой, которая производит глобальные численные прогнозы и не только. Эти данные предоставляются для партнеров ECMWF, так и для более широкого круга лиц, как говорилось выше, некоторые находятся в открытом доступе. Также ECMWF обладает одним из самых мощных суперкомпьютеров и огромными архивами метеорологических данных различной направленности, что позволяет этой организации обеспечивать потребителей и партнеров наиболее точной и актуальной информацией.

На данный момент полный набор данных ERA 5 охватывает период с 1979 года по настоящий момент, стоит отметить, что эти наборы данных продолжают расширяться практически в реальном времени.

ERA 5 работает с использованием системы ассимиляции данных 4D-Var и интегрированной системы прогнозирования IFS (Integrated Forecast System), разработанными ECMWF. Эта система использует 137 гибридных уровней по

вертикали, с верхним уровнем 0,01 гПа, также данные с этих уровней интерполируются на 37 уровней давления и 16 уровней потенциальных температур с помощью системы FULL-POS, включенной в IFS. Также можно получить приземные данные (на уровне 2 метров над поверхностью), например осадки, температура, влажность воздуха и т.д. Также IFS связана с моделью земной поверхности HTESSEL, которая моделирует такие параметры как температура почвы и т.д.

Данные архивируются в архиве данных ECMWF (MARS), и соответствующий поднабор данных, интерполированный в регулярную сетку широты / долготы, копируется на диски хранилища климатических данных (CDS - Climate Data Store) C3S. Набор данных ERA5 содержит одну (ежечасную) реализацию с высоким разрешением (называемую «повторным анализом» или «HRES») и ансамбль из десяти элементов с меньшим разрешением (называемый «ансамбль» или «EDA»). Как правило, данные доступны с периодичностью менее суток и состоят из анализов и коротких (18-часовых) прогнозов, приводящихся дважды в день на основе анализов в 06 и 18 UTC. Большинство анализируемых параметров также доступны из прогнозов.

Также в последнее время введена предварительная версия данных с 1950 по 1978 годы. Хотя во многих других отношениях качество этого анализа относительно хорошее, эти предварительные данные не очень хорошо описывают тропические циклоны, в данный момент этот реанализ совершенствуется, поэтому он доступен как отдельная запись в каталоге CDS (и в MARS), позже будет выпущена обновленная версия, которая объединит данные 1950-1978гг. с актуальными сейчас данными (1979г. – настоящее время).

Все данные доступны в форматах GRIB, также есть возможность получать данные реанализа в формате netCDF, в данной работе использовался именно второй вариант.

Данные с отставанием не более чем на три месяца от реального времени, называются ERA5T. Возможность появления ошибок в данных ERA5T при сравнении с ERA5 крайне мала. Опираясь на опыт производства ERA5 и ERA-Interim, разработчики реанализа могут сказать, что такие ошибки не будут происходить чаще, чем раз в несколько лет, если вообще произойдут.

Как правило ежедневные обновления данных доступны с западанием в 5 дней, а среднемесячные становятся доступны примерно через 5 дней после конца месяца. Стоит отметить, что в настоящее время ежедневная доступность данных ERA5T на CDS может варьироваться.

Атмосферные данные ERA5 HRES имеют разрешение 31 км, 0,28125 градуса, а ERA5 - разрешение 63 км, 0,5625 градуса. (В зависимости от параметра данные архивируются либо в виде спектральных коэффициентов с треугольным усечением T639 (HRES) и T319 (ERA5), либо на уменьшенной гауссовой сетке с разрешением N320 (HRES) и N160 (ERA5). так называемые «линейные сетки», иногда называемые TL639 (HRES) и TL319 (ERA5).)

Данные ERA5, находящиеся на дисках CDS, были предварительно интерполированы в регулярную сетку широты / долготы, подходящую для удобного анализа этих данных.

Если говорить про пространственную привязку данных, используемую в ERA5, то стоит отметить, что IFS предполагает, что Земля является идеальной сферой, но геодезическая широта/долгота наборов данных о высоте поверхности используется, как если бы они были сферической широтой/долготой IFS. Данные ECMWF привязаны по горизонтали к эллипсу, но по вертикали они привязаны к геоиду.

Для данных в формате GRIB1 модель Земли представляет собой сферу с радиусом = 6367,47 км, как определено в спецификациях WMO GRIB Edition. Для данных в формате GRIB2 модель Земли представляет собой сферу с радиусом = 6371,2290 км, как определено в спецификациях WMO GRIB2.

Для данных в формате NetCDF (т.е. преобразованных из собственного формата GRIB в NetCDF) модель земли использует такие же данные как и в GRIB.

Как уже говорилось выше, данные реанализа достаточно легко загрузить из интернета, на рис. 8 представлен пример страницы сайта одного из партнеров ECMWF (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels-monthly-means?tab=form>), пройдя стандартную процедуру

регистрации на этом сайте можно получить доступ к данным реанализа ERA5

Обработка данных реанализа проводилась в также, общедоступной и бесплатной программе OpenGrADS, загрузить данное приложение можно с официального сайта (<http://www.opengrads.org/>), на рис. 7 представлена рабочая область программы, состоящая из панели для ввода команд имеет название OpenGrADS (на переднем плане) и панели для вывода информации имеет название GrADS 2.2.1.oqa.1 (на заднем плане).

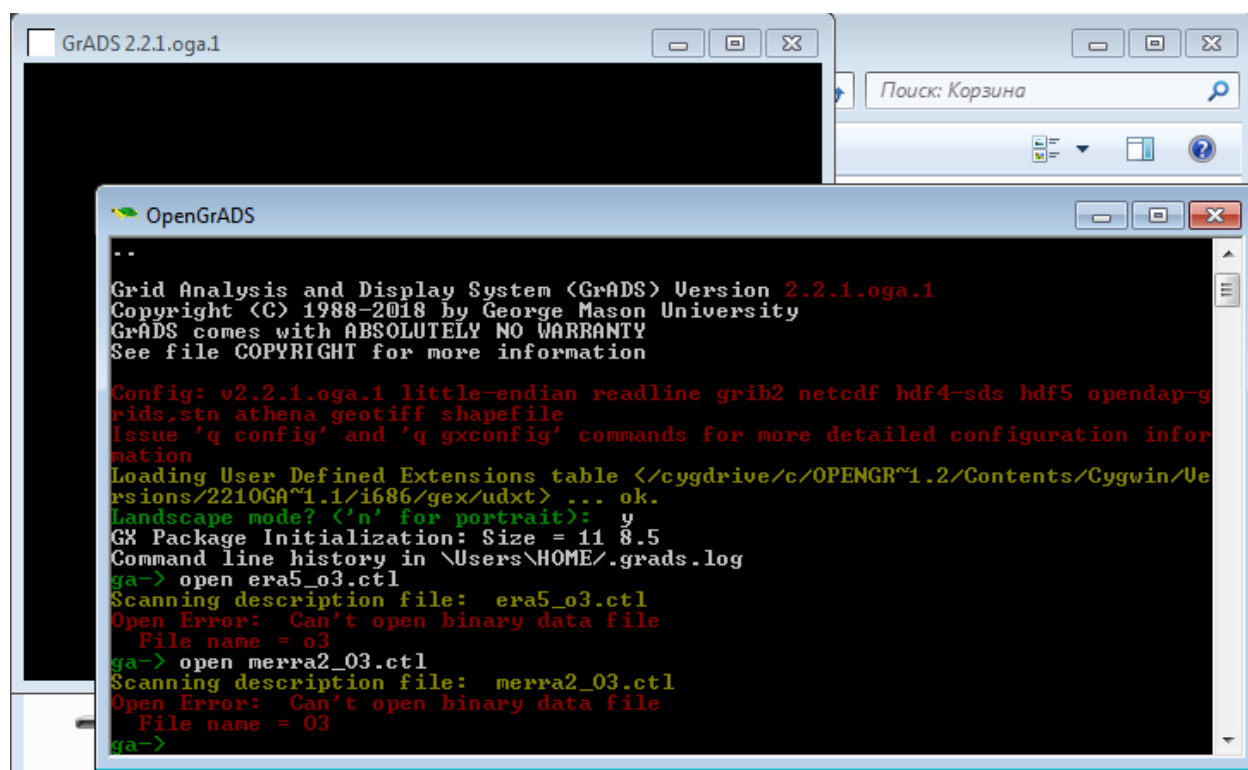


Рис. 7 – пример рабочей области программы OpenGrADS

Clear all

Product type

At least one selection must be made

- ☐ Monthly averaged reanalysis
- ☐ Monthly averaged ensemble members
- ☐ Monthly averaged reanalysis by hour of day
- ☐ Monthly averaged ensemble members by hour of day

Select all

Variable

At least one selection must be made

- ☐ Divergence
 - ☐ Geopotential
 - ☐ Potential vorticity
 - ☐ Specific cloud ice water content
 - ☐ Specific humidity
 - ☐ Specific snow water content
 - ☐ U-component of wind
 - ☐ Vertical velocity
 - ☐ Fraction of cloud cover
 - ☐ Ozone mass mixing ratio
 - ☐ Relative humidity
 - ☐ Specific cloud liquid water content
 - ☐ Specific rain water content
 - ☐ Temperature
 - ☐ V-component of wind
 - ☐ Vorticity (relative)

Select all

Pressure level

At least one selection must be made

- | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| ☐ 1 hPa | ☐ 2 hPa | ☐ 3 hPa | ☐ 5 hPa | ☐ 7 hPa | ☐ 10 hPa |
| ☐ 20 hPa | ☐ 30 hPa | ☐ 50 hPa | ☐ 70 hPa | ☐ 100 hPa | ☐ 125 hPa |
| ☐ 150 hPa | ☐ 175 hPa | ☐ 200 hPa | ☐ 225 hPa | ☐ 250 hPa | ☐ 300 hPa |
| ☐ 350 hPa | ☐ 400 hPa | ☐ 450 hPa | ☐ 500 hPa | ☐ 550 hPa | ☐ 600 hPa |
| ☐ 650 hPa | ☐ 700 hPa | ☐ 750 hPa | ☐ 775 hPa | ☐ 800 hPa | ☐ 825 hPa |
| ☐ 850 hPa | ☐ 875 hPa | ☐ 900 hPa | ☐ 925 hPa | ☐ 950 hPa | ☐ 975 hPa |
| ☐ 1000 hPa | | | | | |

Select all

Year

At least one selection must be made

- ☐ 1979 ☐ 1980 ☐ 1981 ☐ 1982 ☐ 1983 ☐ 1984
☐ 1985 ☐ 1986 ☐ 1987 ☐ 1988 ☐ 1989 ☐ 1990
☐ 1991 ☐ 1992 ☐ 1993 ☐ 1994 ☐ 1995 ☐ 1996
☐ 1997 ☐ 1998 ☐ 1999 ☐ 2000 ☐ 2001 ☐ 2002
☐ 2003 ☐ 2004 ☐ 2005 ☐ 2006 ☐ 2007 ☐ 2008
☐ 2009 ☐ 2010 ☐ 2011 ☐ 2012 ☐ 2013 ☐ 2014
☐ 2015 ☐ 2016 ☐ 2017 ☐ 2018 ☐ 2019 ☐ 2020
☐ 2021

Select all

Month

At least one selection must be made

- ☐ January ☐ February ☐ March ☐ April ☐ May ☐ June
☐ July ☐ August ☐ September ☐ October ☐ November ☐ December

Select all

Time ②

At least one selection must be made.

- | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| ☐ 00:00 | ☐ 01:00 | ☐ 02:00 | ☐ 03:00 | ☐ 04:00 | ☐ 05:00 |
| ☐ 06:00 | ☐ 07:00 | ☐ 08:00 | ☐ 09:00 | ☐ 10:00 | ☐ 11:00 |
| ☐ 12:00 | ☐ 13:00 | ☐ 14:00 | ☐ 15:00 | ☐ 16:00 | ☐ 17:00 |
| ☐ 18:00 | ☐ 19:00 | ☐ 20:00 | ☐ 21:00 | ☐ 22:00 | ☐ 23:00 |

Select all

Geographical area

- Whole available region**
- With this option selected the entire available area will be provided

- Sub-region extraction ?

North
90

West
-180

East
180

South
-90

Рис. 8 – Страница сайта, предназначенного для загрузки данных реанализа ERA5

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА НАД ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ РФ

С помощью данных реанализа ERA 5 и программы OpenGrADS были получены карты отношения смеси озона на уровне 1000 гПа, что примерно соответствует уровню земной поверхности. Карты были построены для Европейской территории России. Для начала были построены осредненные карты отношения смеси озона на уровне 1000 гПа за 6 лет (с 2015 по 2020) (Рис. 9), также были построены карты за более ранний период (Рис. 10). Также для данной территории был построен график среднемесячных значений отношения смеси озона с 2003 по 2020 год, осредненных по всей рассматриваемой территории (График 1.).

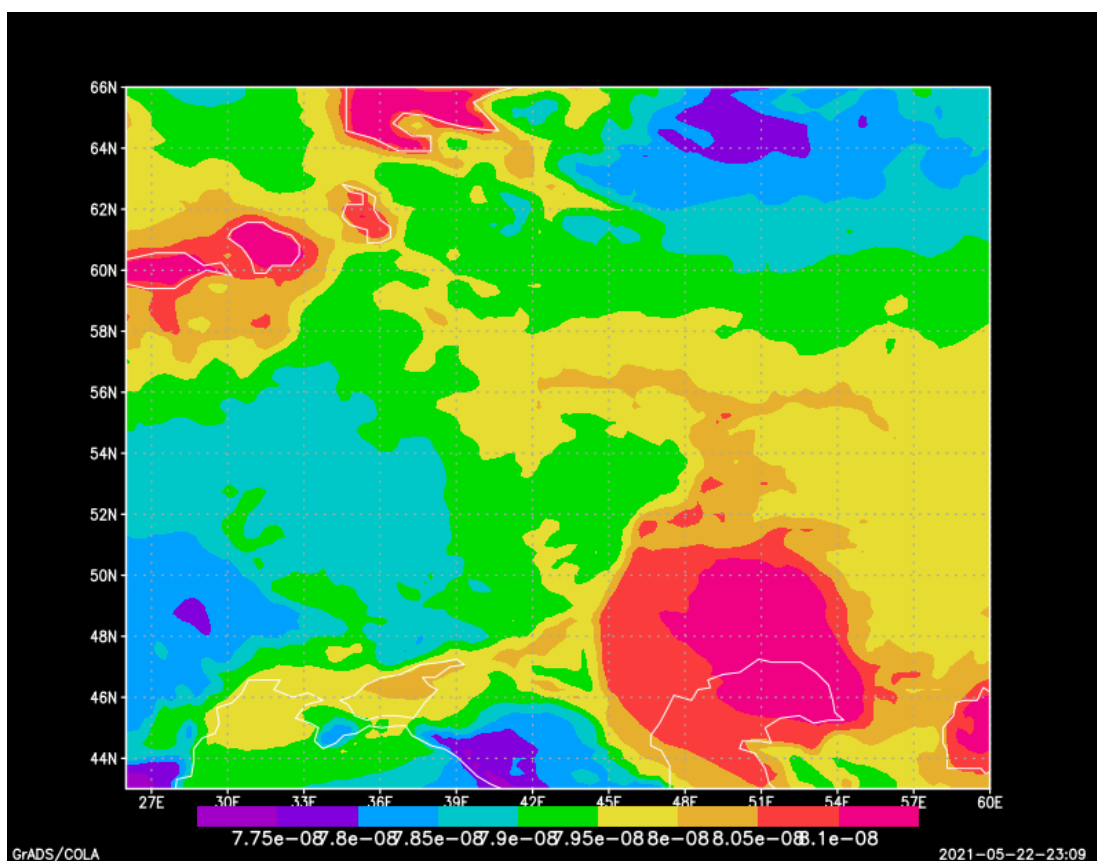


Рис. 9 – Среднее отношение смеси озона на уровне 1000 гПа с 2015 по 2020
год

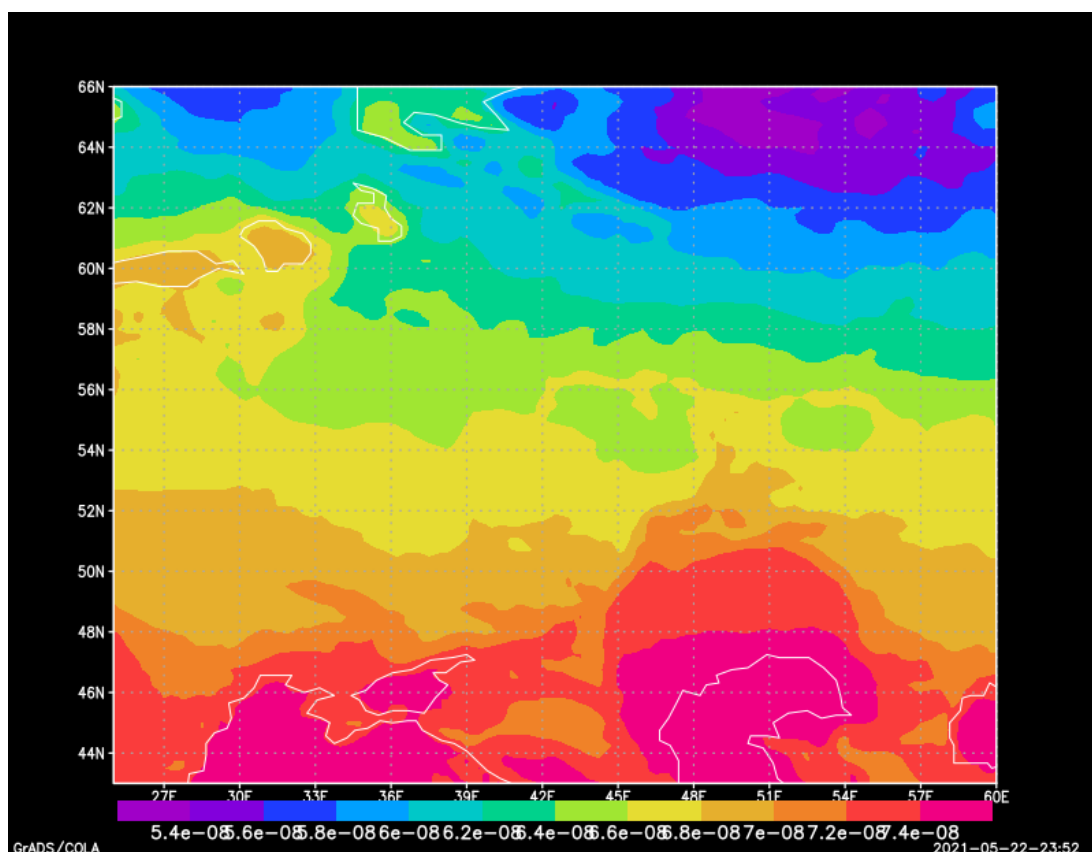


Рис.10 – Среднее отношение смеси озона на уровне 1000 гПа 2009 по 2014
год

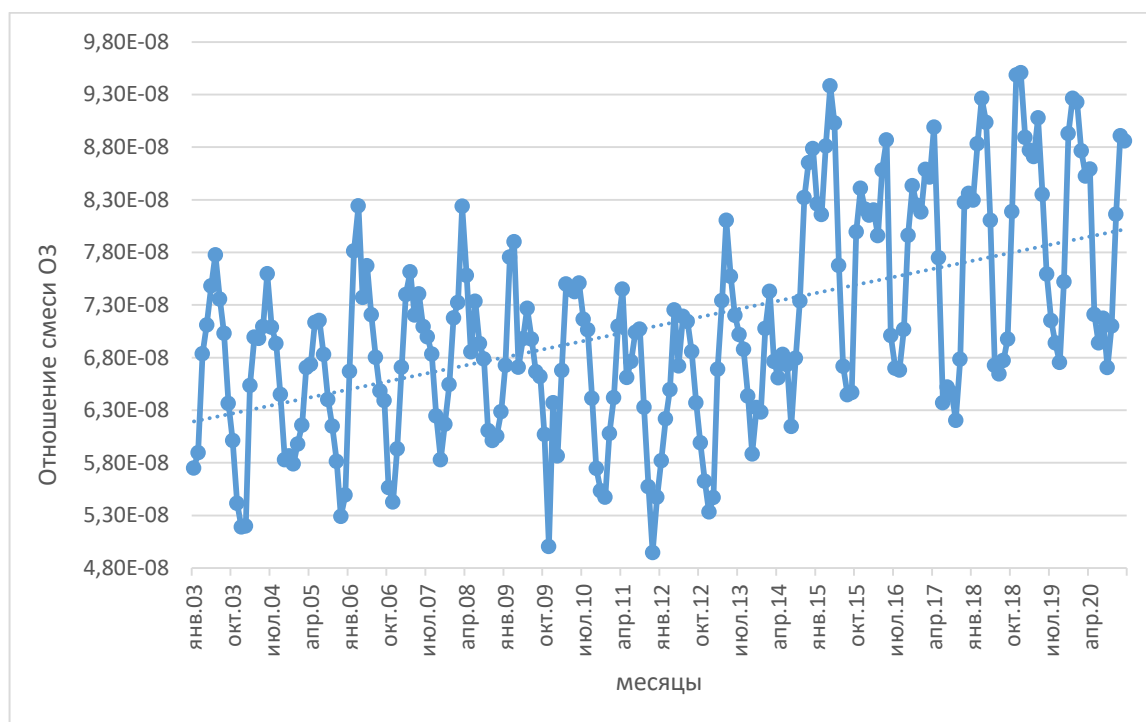


График 1 – Среднемесячные значения отношения смеси озона на
европейской территории России с 2003 по 2020 год

Также стоит добавить осредненные карты по разным сезонам, чтобы можно было выявить какие-либо закономерности распределения приемного озона в зависимости от времени года (Рис. 11 – 14). На картах можно видеть

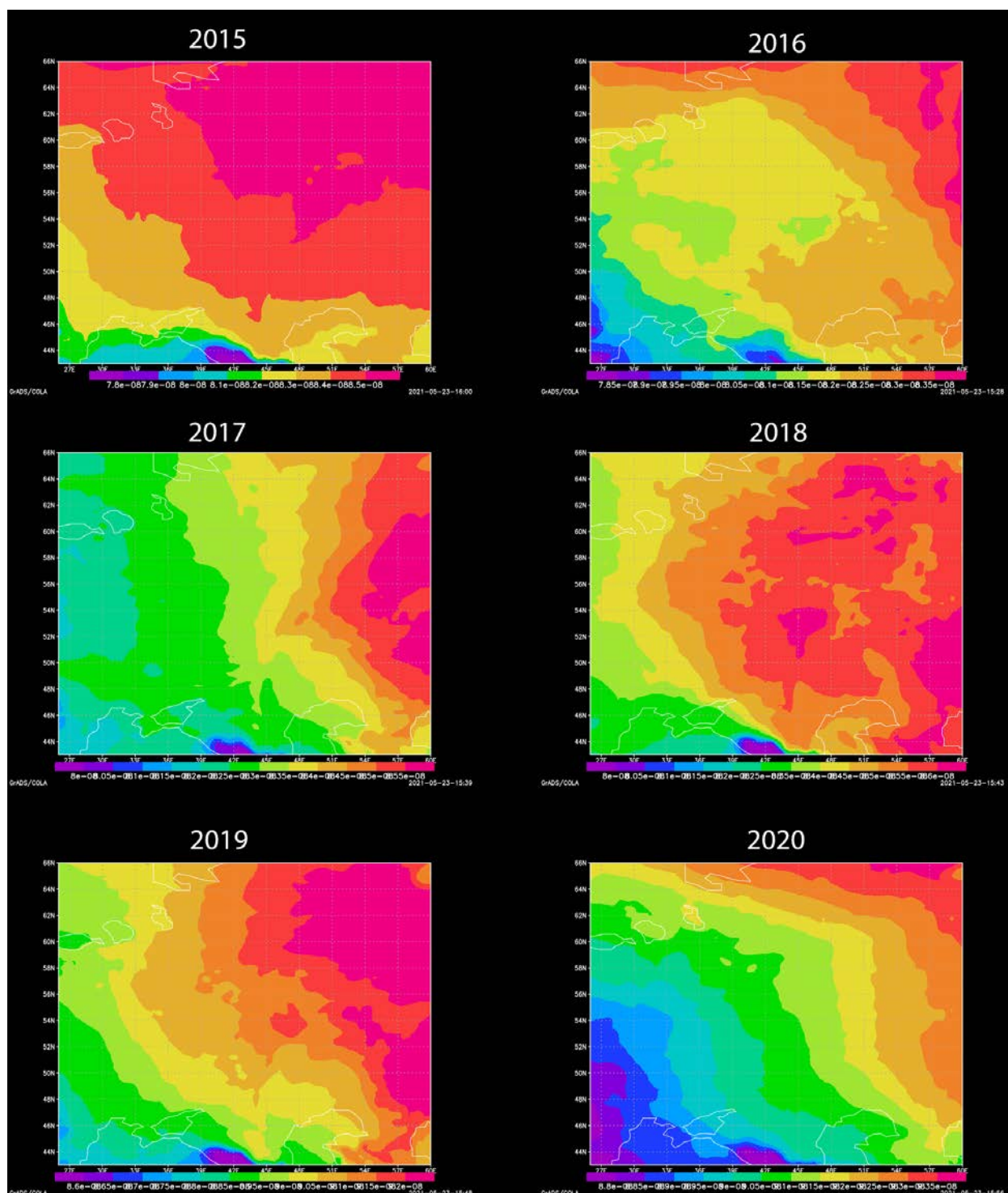


Рис. 11 - Среднее отношение смеси озона на уровне 1000 гПа с 2015 по 2020 в зимний период

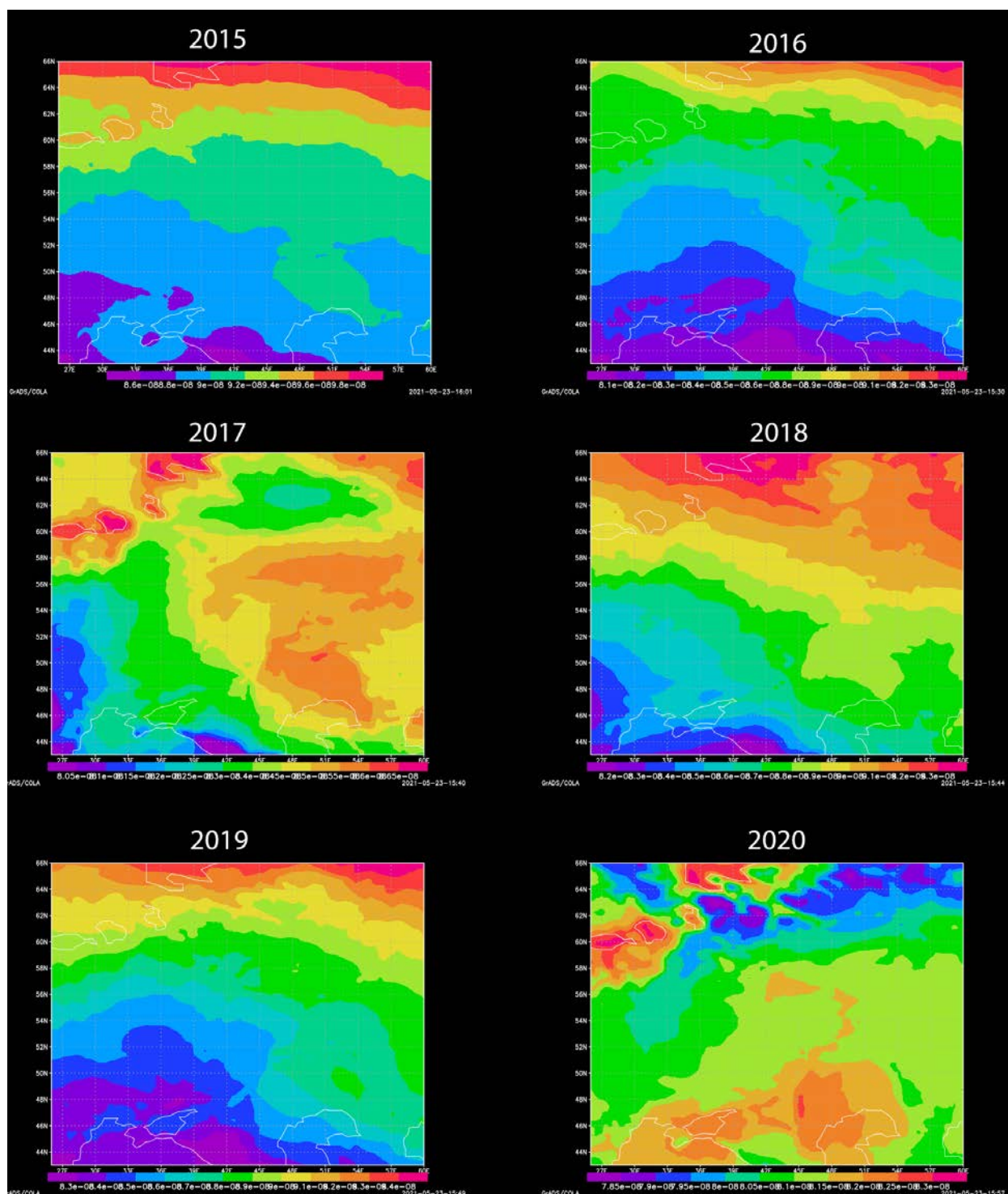


Рис. 12 - Среднее отношение смеси озона на уровне 1000 гПа с 2015 по 2020 в весенний период

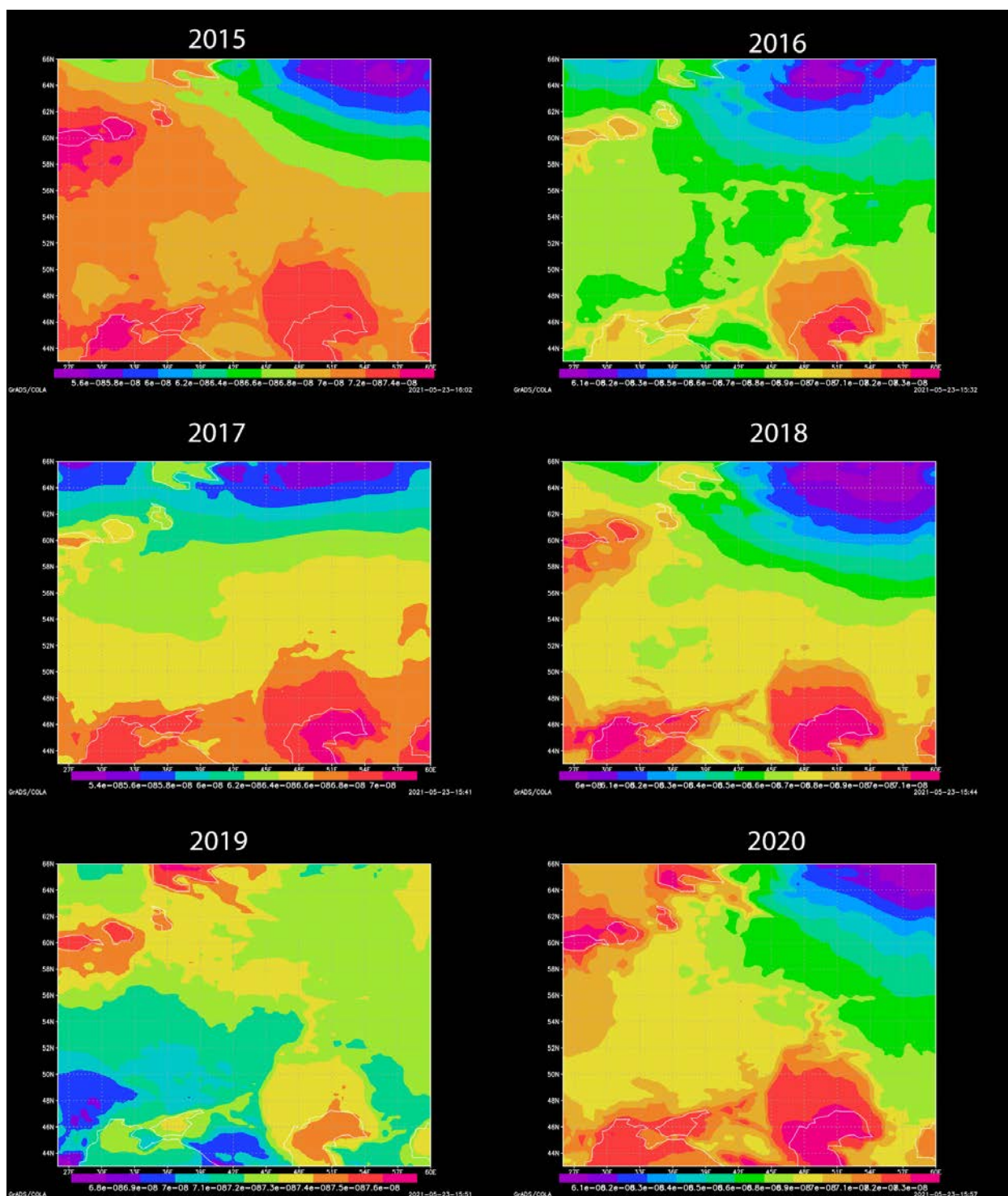


Рис. 13 - Среднее отношение смеси озона на уровне 1000 гПа с 2015 по 2020
в летний период

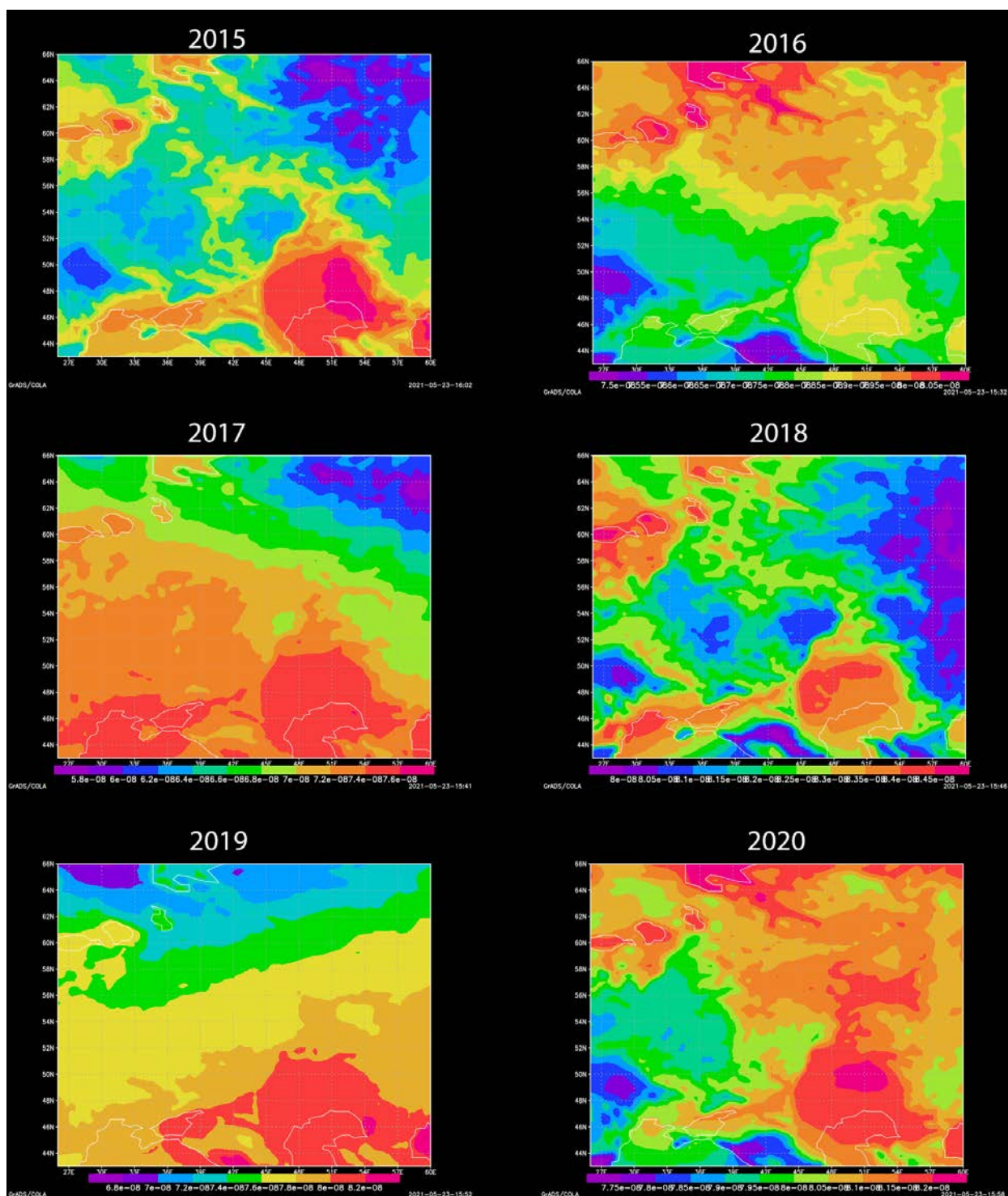


Рис. 14 - Среднее отношение смеси озона на уровне 1000 гПа с 2015 по 2020
в осенний период

Из выше представленных карт и графиков можно видеть, что к сожалению, содержание озона в приземном воздухе с каждым годом увеличивается, именно поэтому так важен контроль этого загрязняющего вещества.

Также можно наблюдать некоторые сезонные закономерности, а именно мы видим, что в зимний и весенний период основную роль в формировании загрязнения играют не локальные факторы, а общие закономерности распределения. Мы практически не видим на рисунках 11 и 12 отдельных районов с повышенными концентрациями озона, карты достаточно равномерные.

В летний и осенний период картина несколько другая, а именно мы можем видеть на рисунках 13 и 14 достаточно пестрые карты, с большим количеством зон повышенных концентраций озона, разбросанных по всей европейской территории России. Соответственно, можно сделать вывод, что в летний и осенний период повышенные концентрации в основном обуславливаются локальными факторами и особенностями.

На практически всех картах достаточно выразительно выделяются некоторые зоны, а именно побережье Каспийского моря, а также северо-западный район (Финский залив и Ладожское озеро)

Таким образом, оценив представленные выше данные можно выделить интересующие нас районы, это берег Каспия и окрестности Санкт-Петербурга. Также к этим областям стоит добавить Московский регион, так как Москва является крупнейшим городом Европейской территории России и не может не оказывать значительное влияние на концентрации озона в пригородных районах.

На ниже представленном изображении можно видеть расположение интересующих нас точек на карте, номером 1 обозначена точка в восточных пригородах Москвы, номером 2 обозначена точка рядом с Санкт-Петербургом, номером 3 обозначена точка, находящаяся на побережье Каспийского моря, на границе Калмыкии и Астраханской области. Точки расположены не непосредственно в крупных городах, а в восточных

пригородах, чтобы можно было оценивать влияние крупных городов на пригороды.

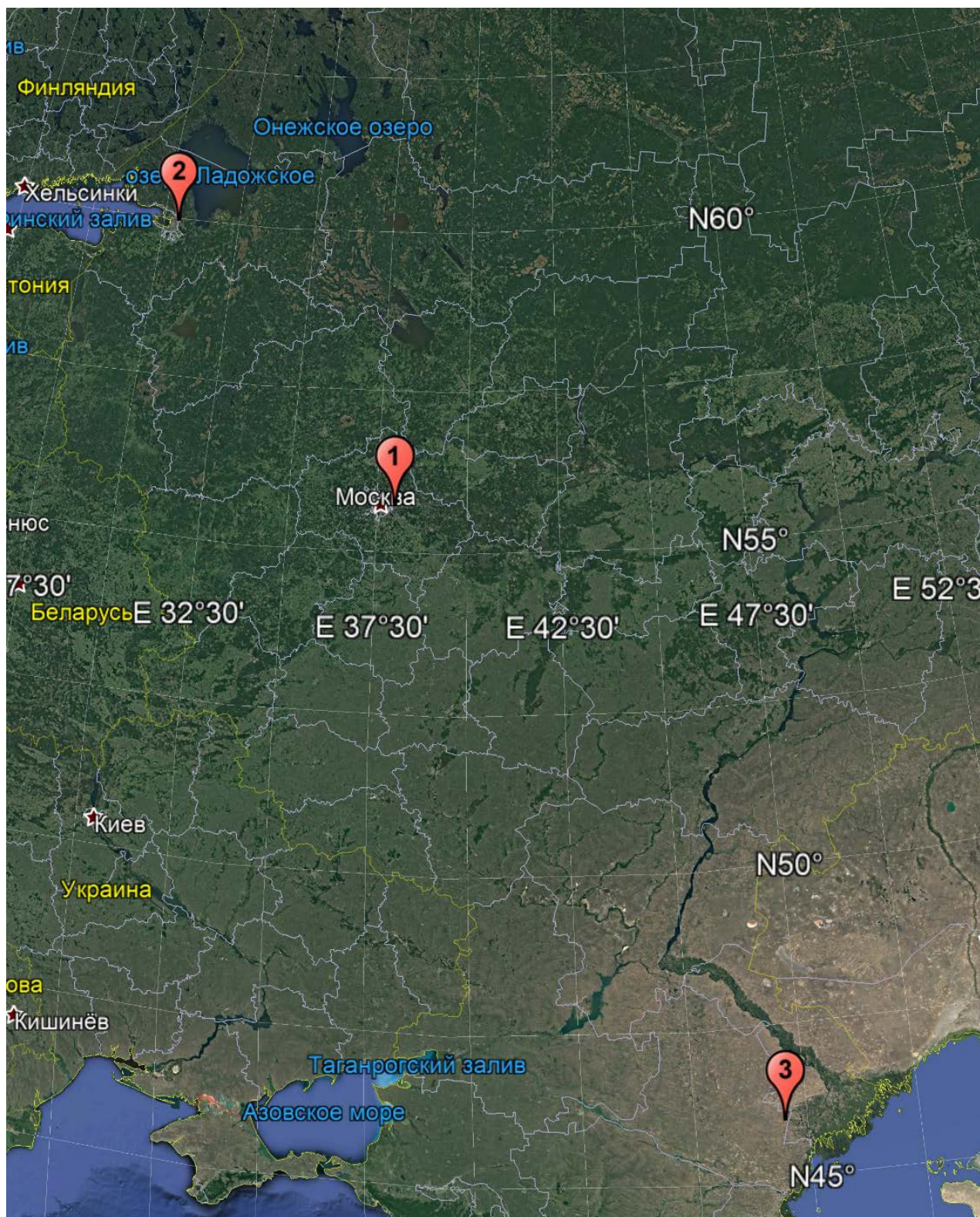
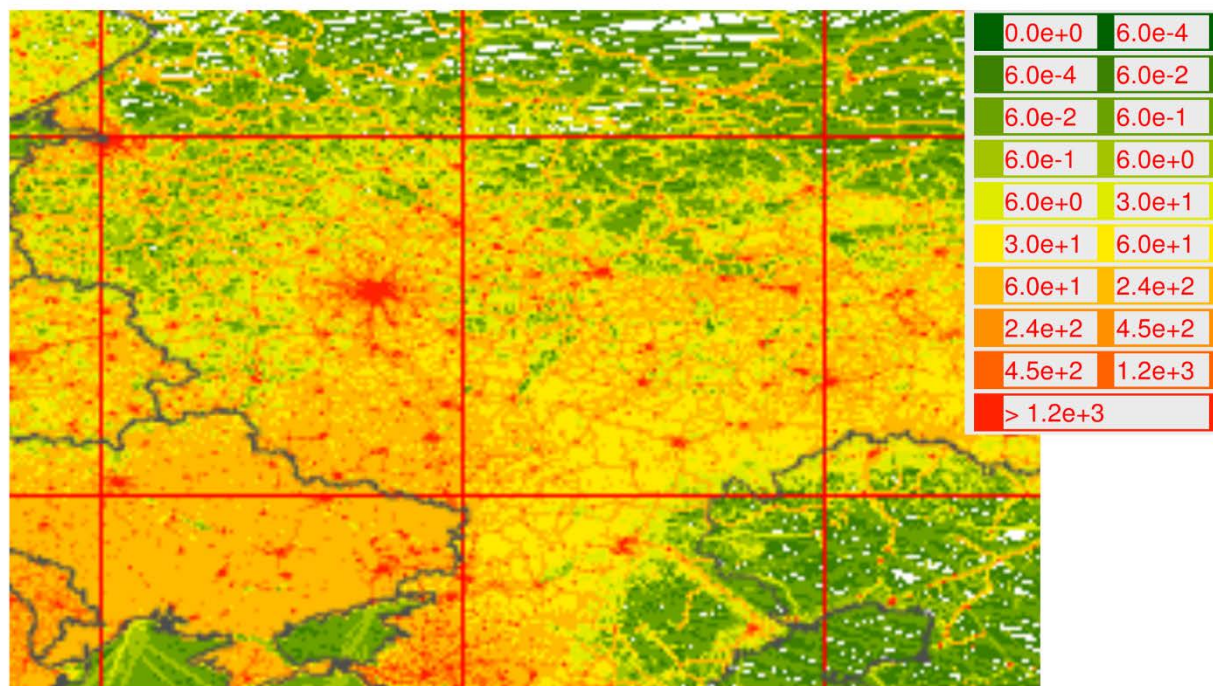


Рис. 15 - Расположение анализируемых точек

Выбросы Co в 2015 году



Выбросы NOx в 2015 году

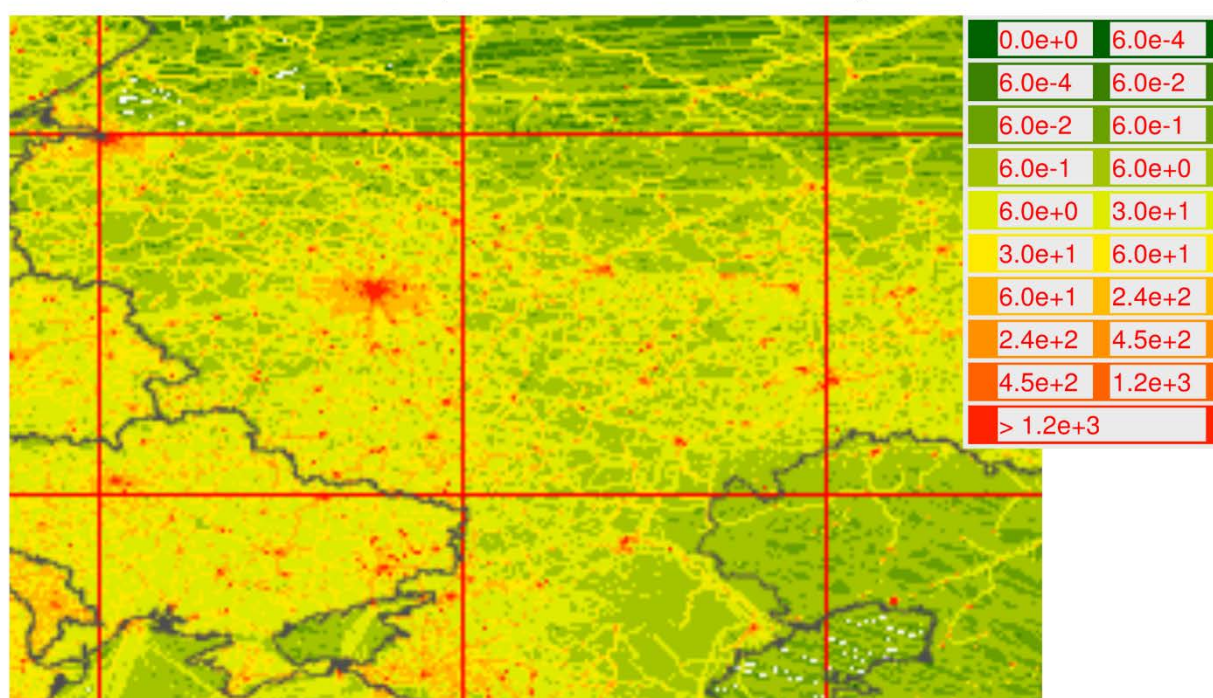
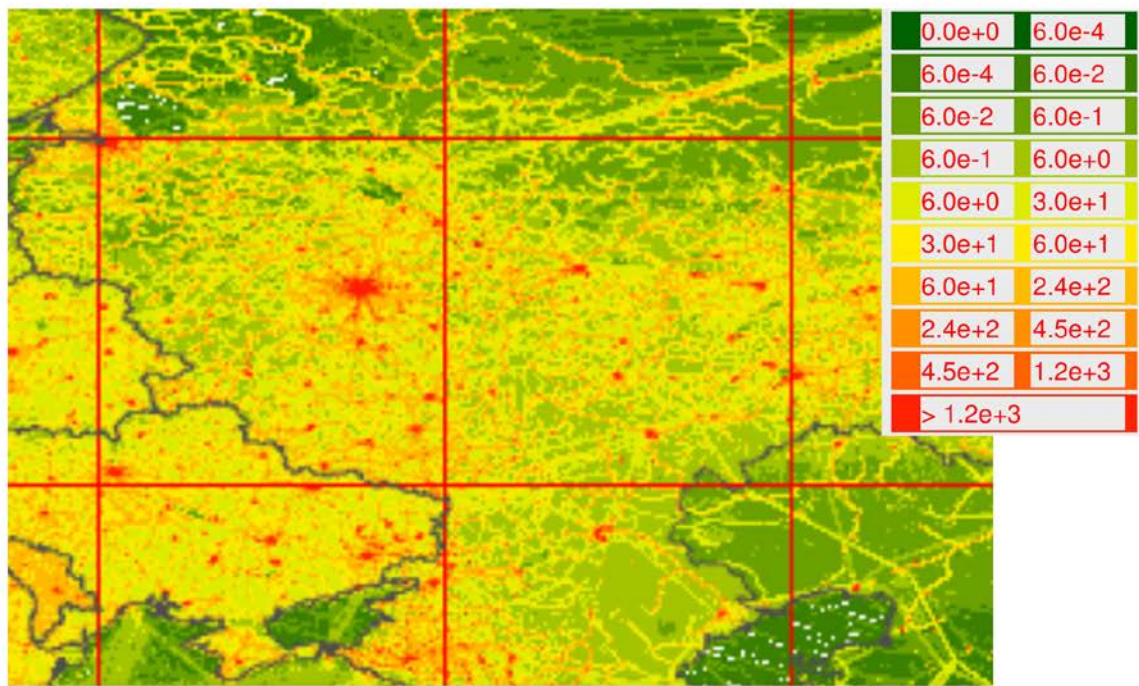


Рис. 16 – Выбросы в атмосферу Nox и Co в 2015

Мы знаем, что озон является вторичным загрязнителем, он образуется в результате химических реакций в присутствии солнечного света и загрязнителей предшественников, таких как оксиды азота (Nox), летучих органических соединений (ЛОС, или VOC в английской литературе), и также

оксидом углерода (CO). На рисунке 16 представлены основные источники NOx и CO, которые могут оказывать влияние на концентрации озона в разных регионах.

Выбросы NMVOC в 2015 году



Выбросы R-CHO в 2012 году

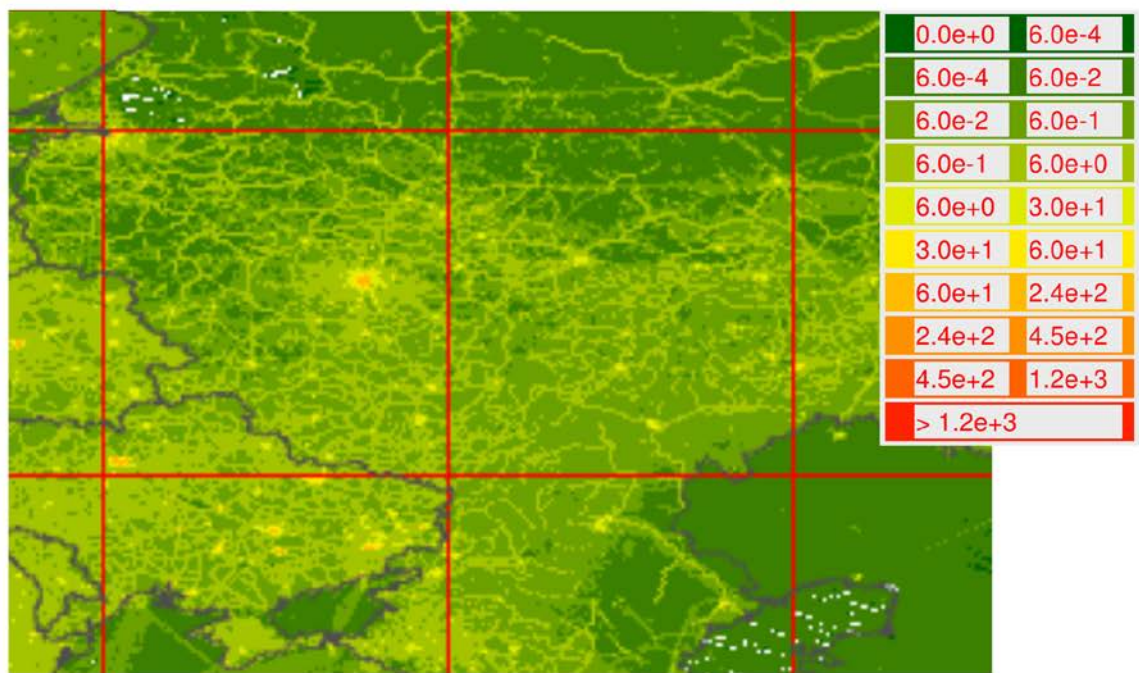


Рис. 17 – Выбросы в атмосферу NMVOC в 2015 и R-CHO в 2012

На рисунке 17 представлены выбросы в атмосферу некоторых ЛОСов (VOC), которые участвуют в образовании озона. NMVOC – это неметановые ЛОС, а R-CHO – альдегиды, участвующие в формировании озона.

Из выше представленных карт мы видим, что основными источниками предвестников озона являются крупные города, и инфраструктура, связанная с этими городами, мы отчетливо можем видеть на картах крупнейшие города ЕТР (Москву и Санкт-Петербург)

3.1 Пункт 1 (Московский регион)

Для данного пункта можно выделить несколько тенденций и причин возникновения повышенных значений отношения смеси озона. Например, случаи, когда воздушная масса с повышенными концентрациями ОЗ перемещалась не из пределов московской области, и Москва в данном случае не оказывала влияние на концентрации ОЗ (траектории не проходили через мегаполис, или на картах не наблюдалось высоких концентраций озона в черте города, или близко к нему), пример данной ситуации можно наблюдать на рисунке 18, серым овалом выделены примерные очертания Москвы на карте, черной точкой выделен пункт 1. Такую ситуацию можно разделить на 2 случая, которые будут рассмотрены ниже. Во-первых, выделим перемещение с северо-запада, севера, северо-востока и востока (Тверская, Ярославская, Ивановская, Владимирская области, или находящиеся рядом районы московской области), такие случаи наблюдались 18 раз из 62 (29,03%), из таблицы 3 видно, что меньше всего такие ситуации наблюдались осенью и зимой, а чаще всего летом и весной.

Месяцы	всего случаев	наблюдалась данная картина	%
Декабрь – Февраль	15	4	26,6667
Март – Май	14	5	35,7143
Июнь – Август	17	7	41,1765
Сентябрь – Ноябрь	16	2	12,5

Таблица 3

Во-вторых, выделим перемещение с запада, юго-запада, юга, и юго-востока (Смоленская, Калужская, Тульская, Рязанская область, или находящиеся рядом районы Московской области), такие случаи наблюдались 17 раз из 62 (27,42%), при взгляде на таблицу 4, можно увидеть, что чаще всего такие ситуации наблюдались зимой и осенью, а меньше всего летом и весной, из этого можно сделать вывод, что ситуация 1 характерна для лета и осени, а ситуация 2 для весны и зимы.

месяцы	всего случаев	наблюдалась данная картина	%
Декабрь - Февраль	15	6	40
Март - Май	14	3	21,4286
Июнь - Август	17	3	17,6471
Сентябрь - Ноябрь	16	5	31,25

Таблица 4

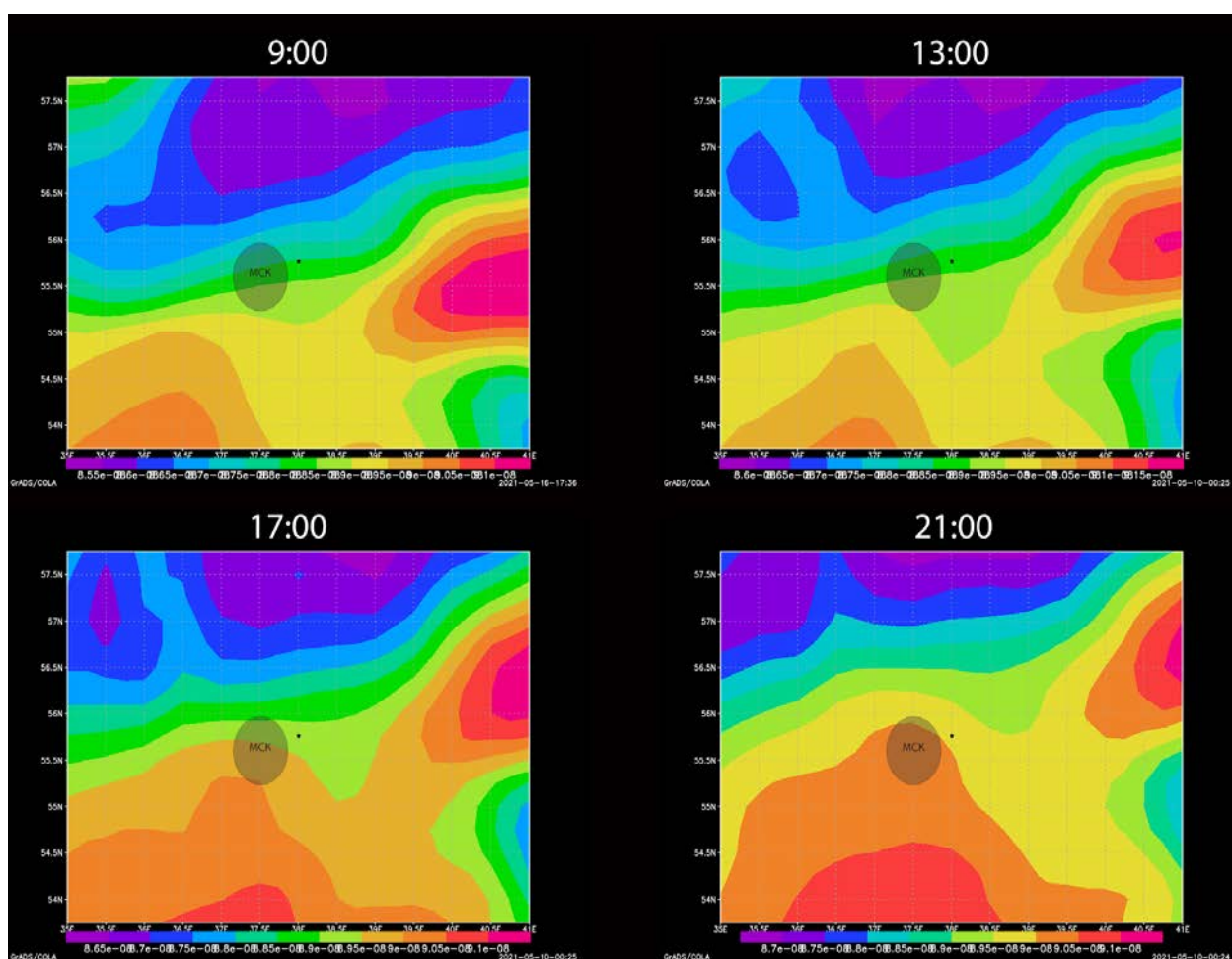


Рис. 18 - Случай, когда Москва не оказывала влияние на концентрации озона

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 2200 UTC 02 May 19
GDAS Meteorological Data

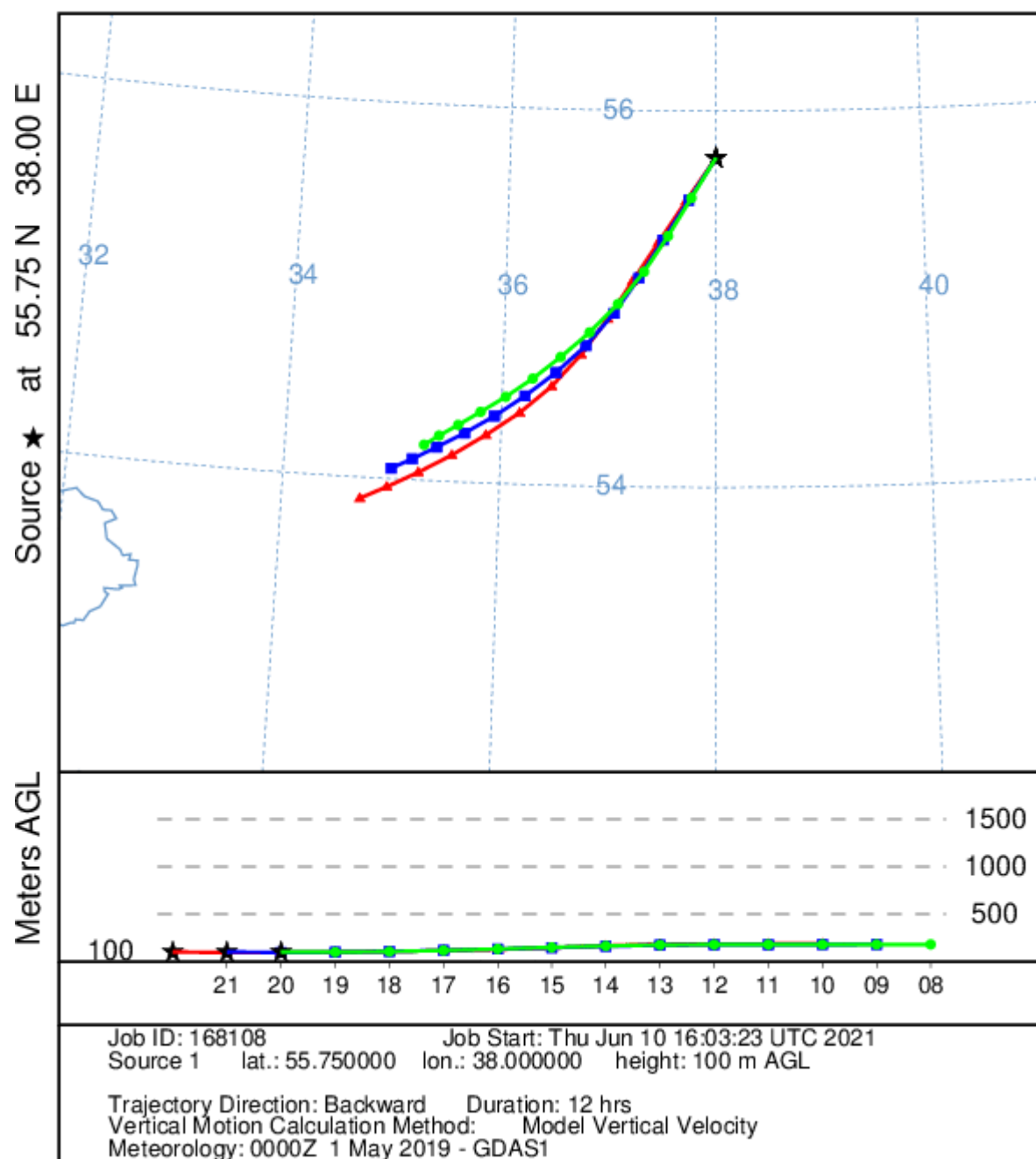


Рис. 19 - Результат работы модели, ситуация, когда Москва не оказывала влияние на концентрации оз

Третьим случаем стоит отметить момент, когда Москва непосредственно влияла на концентрации озона (однозначно видно, что траектории проходили через мегаполис, или на картах наблюдались высокие концентрации озона в черте города, или близко к нему). Данная картина наблюдалась 27 раз за год, это рано 43.54% от всех случаев (62). Согласно таблице 5, минимальное количество таких случаев наблюдалось зимой, а максимум пришелся на осень, весной и летом ситуация была примерно одинаковой.

месяцы	всего случаев	наблюдалась данная картина	%
Декабрь - Февраль	15	5	33,3333
Март - Май	14	6	42,8571
Июнь - Август	17	7	41,1765
Сентябрь - Ноябрь	16	9	56,25

Таблица 5

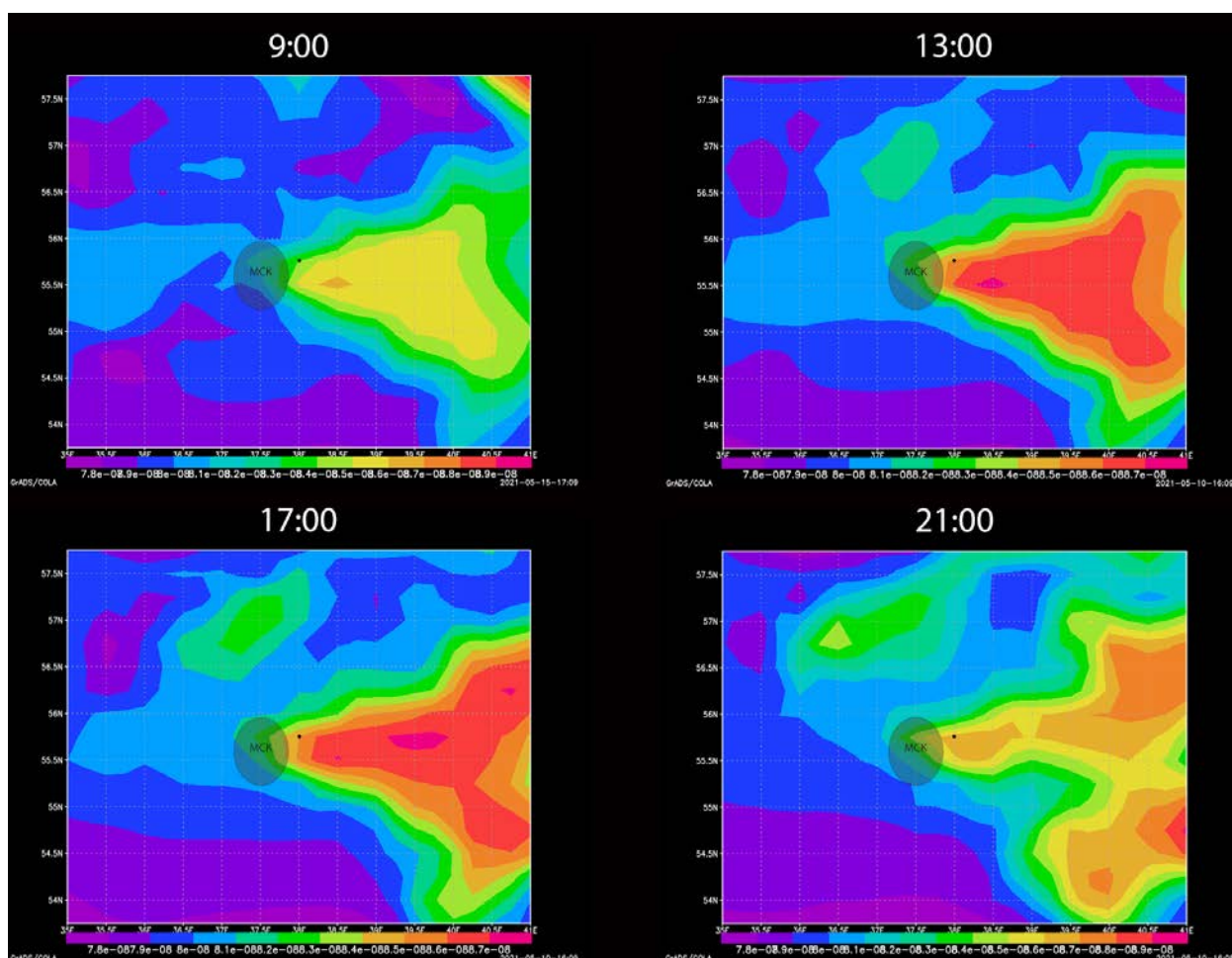


Рис. 20 - Случай, когда Москва оказывала влияние на концентрации озона

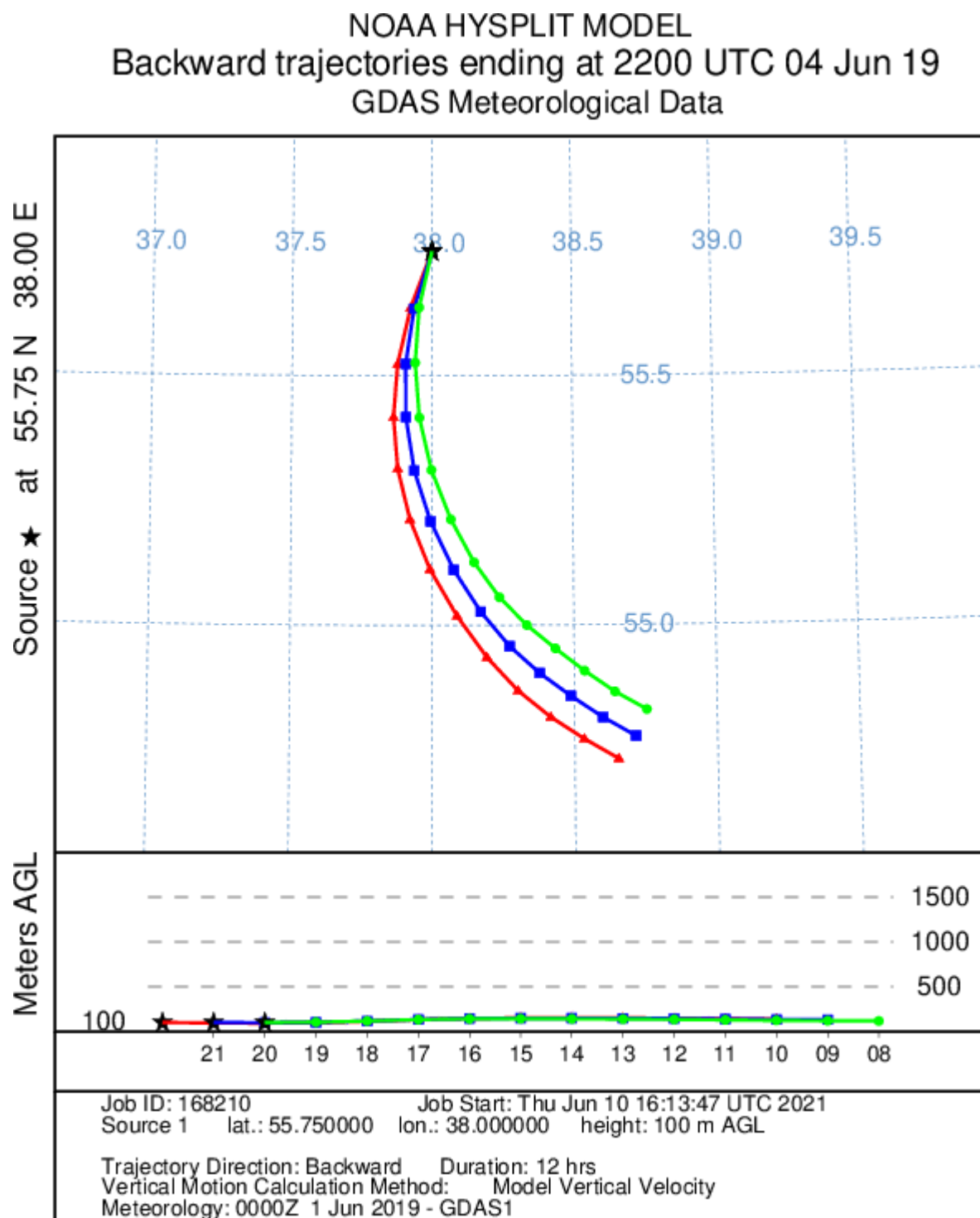


Рис. 21 - Результат работы модели, ситуация, когда Москва не оказывала влияние на концентрации оз

В данной ситуации модель показывала нам некоторый перенос с юга московской области (Рис. 21), но на рисунке 20 видно, что высокие концентрации озона наблюдались вблизи Москвы практически все 12 часов, соответственно мы делаем вывод, что в таких ситуациях Москва вносила ключевой вклад.

3.2 Пункт 2 (точка находится восточнее Санкт-Петербурга)

Если выделять такие же особенности для точки, находящийся рядом с Санкт-Петербургом, можно выделить следующие тенденции, во-первых, влияние на концентрации оз оказывал перенос массы с промышленных районов и городов, находящихся за пределами Ленинградской области. В данном случае и далее пункт выделен на картах белым кругом. Всего таких случаев за год было 14, и это 28,57% от общего количества (49). Из таблицы 6 видно, что зимой и весной наблюдалось примерно одинаковое количество таких ситуаций, а минимум пришелся на лето и осень.

месяцы	всего случаев	наблюдалась данная картина	%
Декабрь - Февраль	14	5	35,71429
Март -Май	15	6	40
Июнь - Август	13	2	15,38462
Сентябрь - Ноябрь	7	1	14,28571

Таблица 6

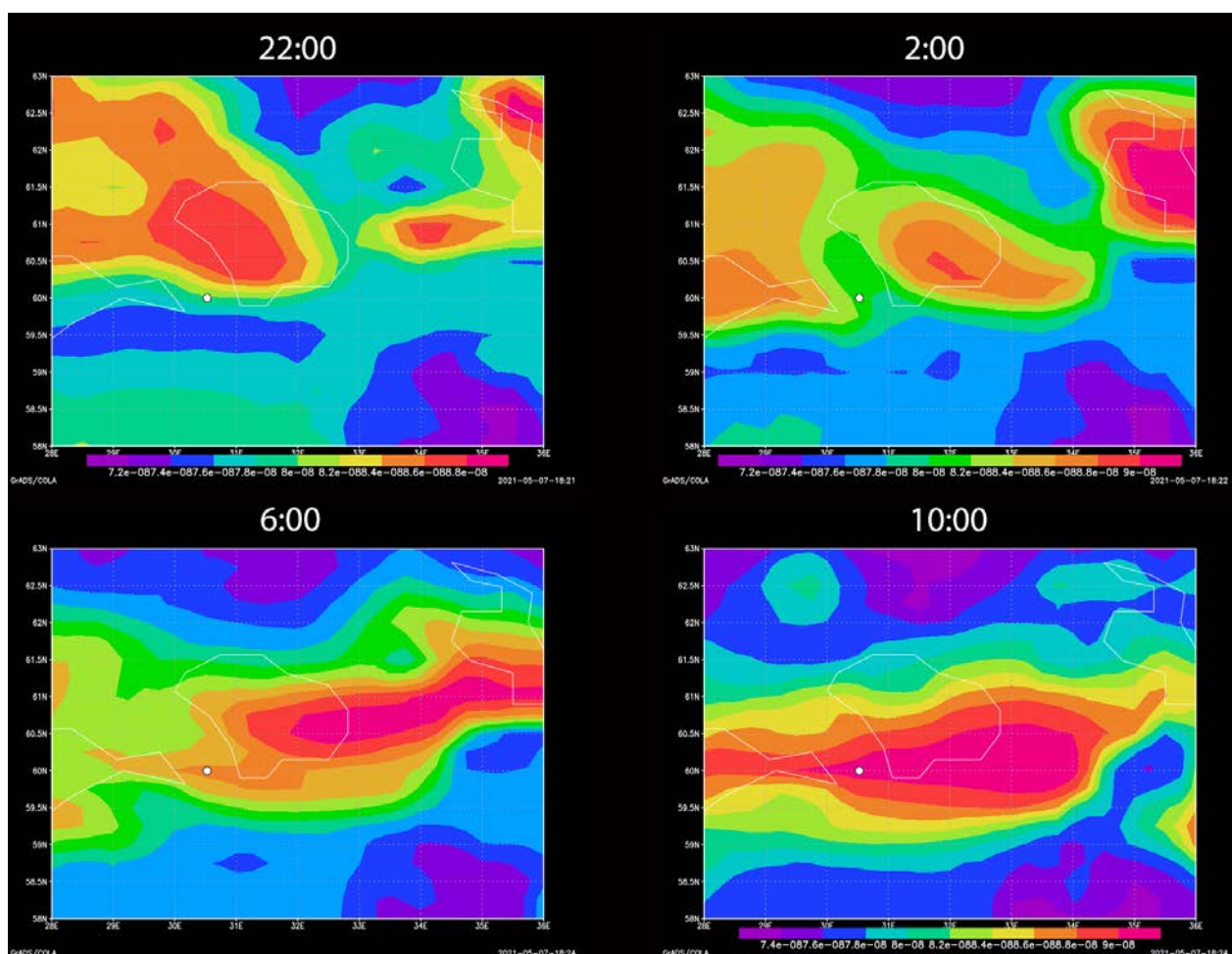


Рис. 22 - Случай, промышленные города севера влияли на концентрации озона в исследуемой точке

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 1100 UTC 12 Jun 19
GDAS Meteorological Data

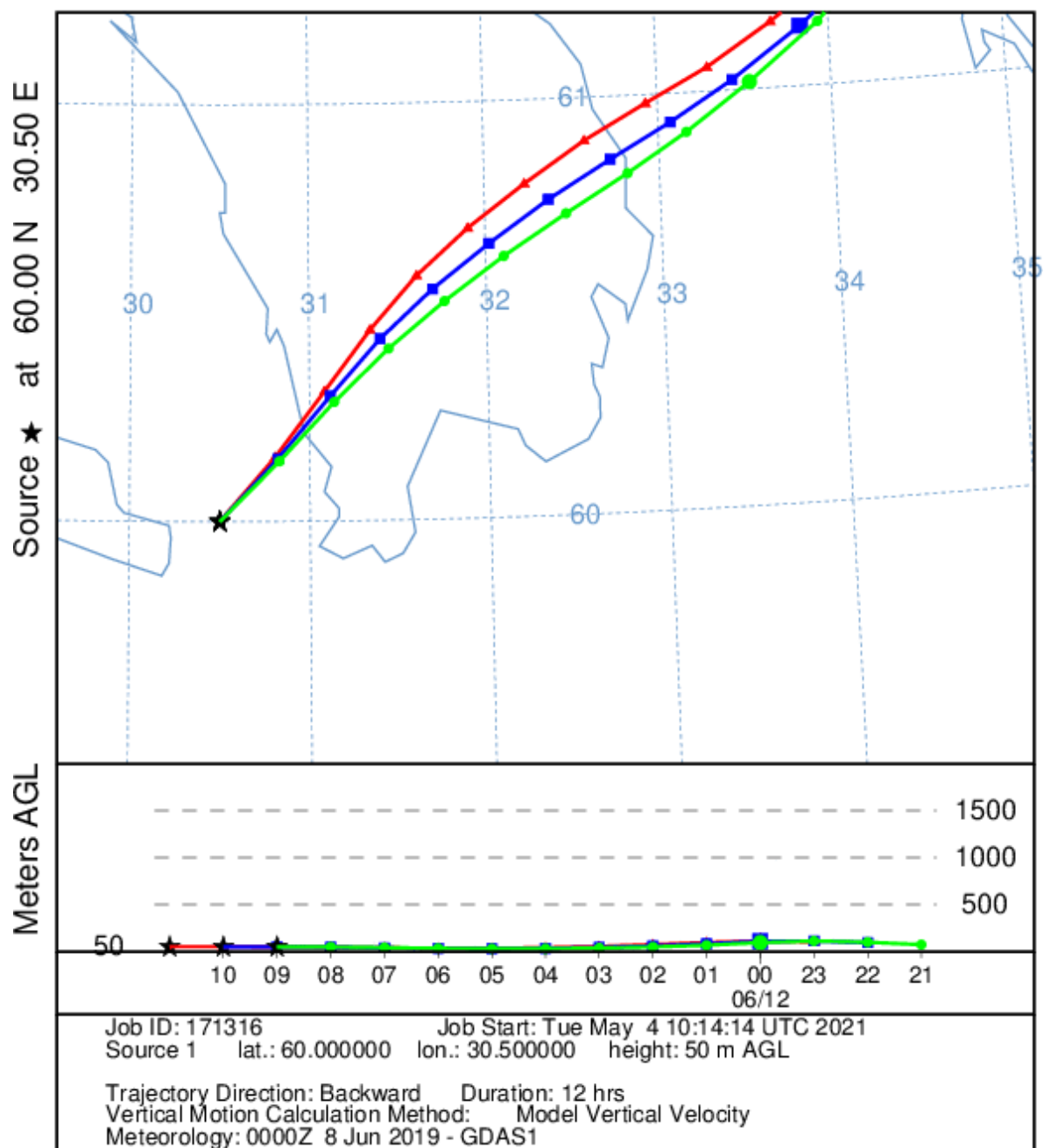


Рис. 23 - Результат работы модели, ситуация, когда промышленные города
севера влияли на концентрации оз

Вторая ситуация, которую стоит выделить – это перенос воздушной массы с высоким содержанием ОЗ из Европы. В данном случае масса как правило проходила через город, так как пункт находится западнее, но здесь будут отмечены случаи, когда перенос из Европы внес основной вклад. Всего таких случаев за год было 20, и это 40,86% от общего количества (49). Из таблицы 7 видно, что меньше всего таких случаев наблюдалось осенью, примерно одинаковое количество наблюдалось зимой и весной, а летом процент был наибольшим.

месяцы	всего случаев	наблюдалась данная картина	%
Декабрь - Февраль	14	6	42,85714
Март -Май	15	6	40
Июнь - Август	13	8	61,53846
Сентябрь - Ноябрь	7	0	0

Таблица 7

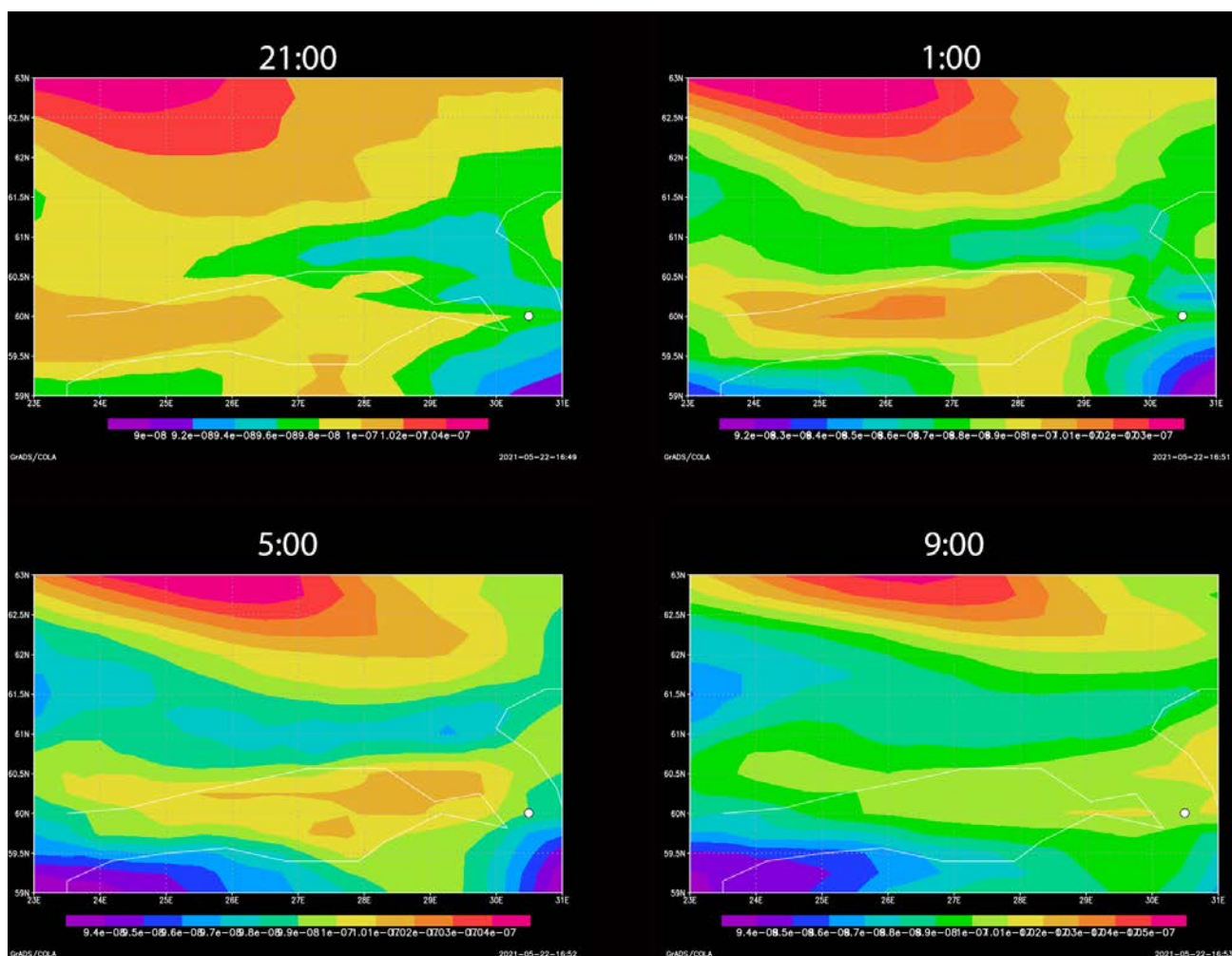


Рис. 24 – Пример ситуации, когда Европа влияла на концентрации озона в исследуемой точке

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 1000 UTC 04 May 19
GDAS Meteorological Data

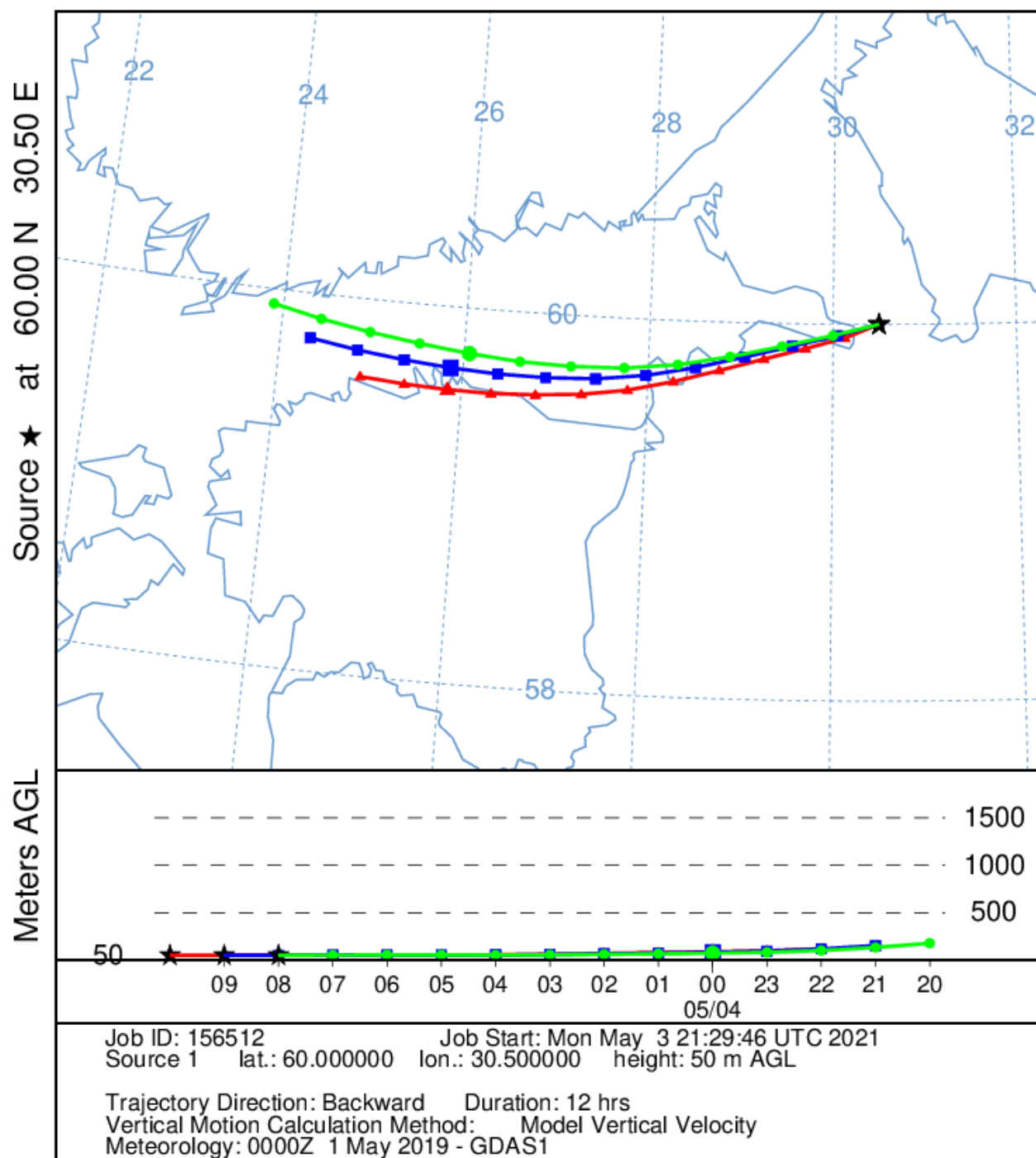


Рис. – 26 Результат работы модели, ситуация, когда перенос из Европы оказывал влияние на концентрации оз

Третьей выделим ситуацию, когда Санкт-Петербург оказывал влияние на отношение смеси оз в исследуемом пункте. В данной ситуации над городом, или рядом с ним наблюдались высокие концентрации оз. Всего таких случаев 15, это около 30,61% из всех (49) случаев. Из таблицы 8 видно, что с декабря по август количество случаев за сезон было одинаковым, максимум таких ситуаций пришелся на осень (6 случаев из 7).

На Рис. 27 видно, что, хотя траектории и приходили с севера, они проходили через город, также на рисунке 26 видно, что на протяжении 12 часов в районе города наблюдались высокие концентрации озона.

месяцы	всего случаев	наблюдалась данная картина	%
Декабрь - Февраль	14	3	21,42857
Март -Май	15	3	20
Июнь - Август	13	3	23,07692
Сентябрь - Ноябрь	7	6	85,71429

Таблица 8

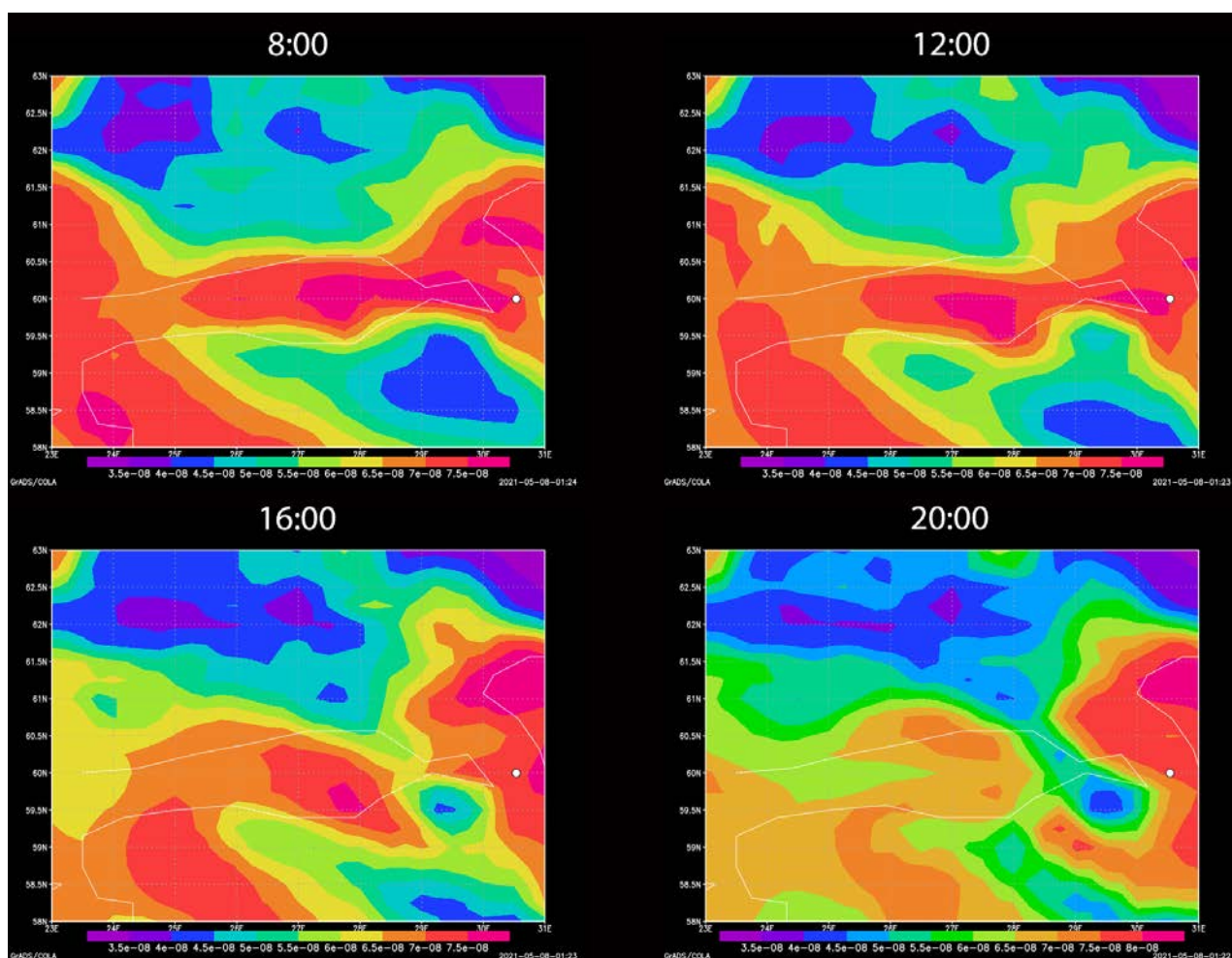


Рис. 26 – пример ситуации, когда Санкт-Петербург влиял на концентрации ОЗ в исследуемой точке

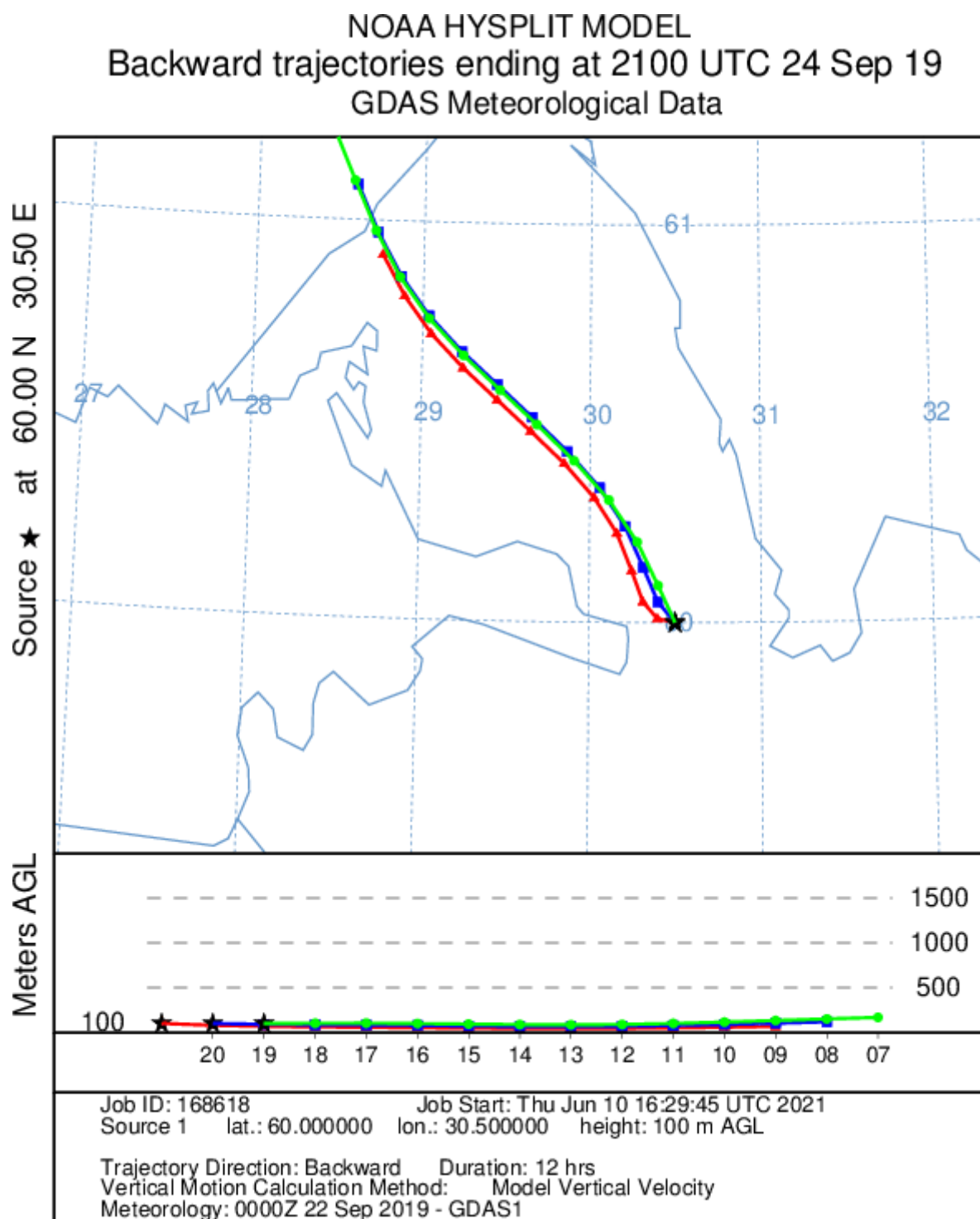


Рис. – 27 Результат работы модели, ситуация, когда Санкт-Петербург влиял на концентрации ОЗ

3.3 Пункт 3 (Прикаспийский район)

С точкой, находящийся вблизи Каспийского моря ситуация несколько иная, чем для первых 2-х случаев, здесь практически нет крупных городов, которые могут продуцировать большое количество предвестников озона за исключением Астрахани, но, если взглянуть на рис. 9, мы увидим, что выбросы NO_x и CO для этого города не идут ни в какое сравнение с Москвой, или Санкт-Петербургом. Но, в данном районе (по всему побережью Каспия и на море) в достаточно хорошей степени развита нефтяная и газовая добыча, продуцирующая предвестники озона, указанные выше.

Итак, первой выделим ситуацию, когда виновниками повышенных концентраций озона стали местные источники (воздушная масса образовалась на территории Калмыкии, или Астраханской области). Таких случаев было 28 из 66 (42,42%). Из таблицы 7 можно видеть, что больше ситуаций наблюдалось зимой, и осенью, меньше всего их было весной.

месяцы	всего случаев	наблюдалась данная картина	%
Декабрь - Февраль	12	7	58,33333333
Март - Май	17	3	17,64705882
Июнь - Август	18	8	44,44444444
Сентябрь - Ноябрь	19	10	52,63157895

Таблица 7

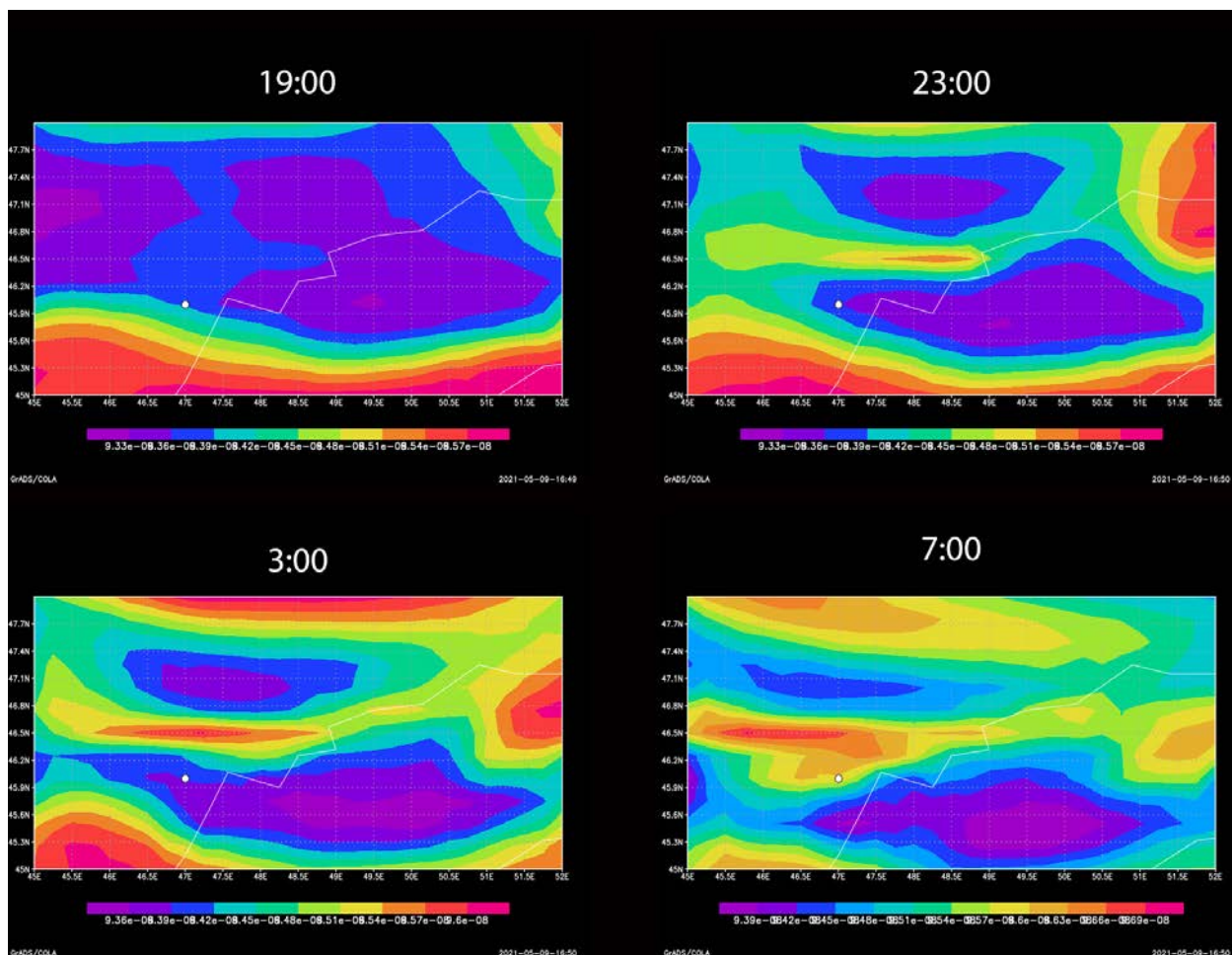


Рис. 28 – ситуация, когда местные источники влияли на содержание озона

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0800 UTC 24 Nov 19
GDAS Meteorological Data

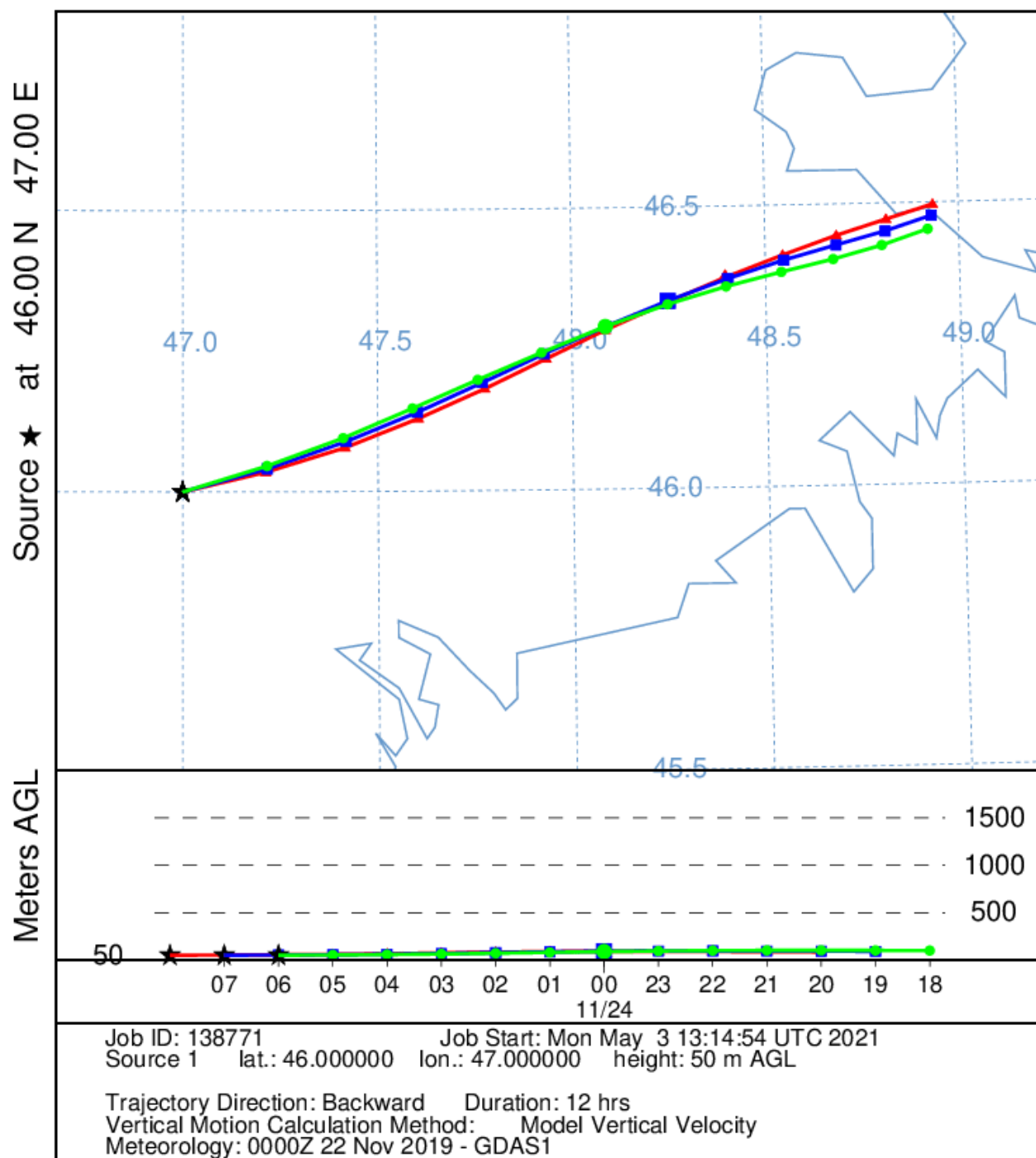


Рис. 29 – Результат работы модели, случай, когда ключевыми были местные источники

Вторая ситуация, которую стоит выделить – то перемещение воздушной массы с высоким содержанием оз с территорий Казахстана. Таких случаев наблюдалось 35 (53,03% от всех 66 случаев), из таблицы 8 видно, что больше всего таких ситуаций было в весенний период, в остальное же время соотношение было примерно одинаковым.

месяцы	всего случаев	наблюдалась данная картина	%
Декабрь - Февраль	12	5	41,66666667
Март - Май	17	14	82,35294118
Июнь - Август	18	7	38,88888889
Сентябрь - Ноябрь	19	9	47,36842105

Таблица 8

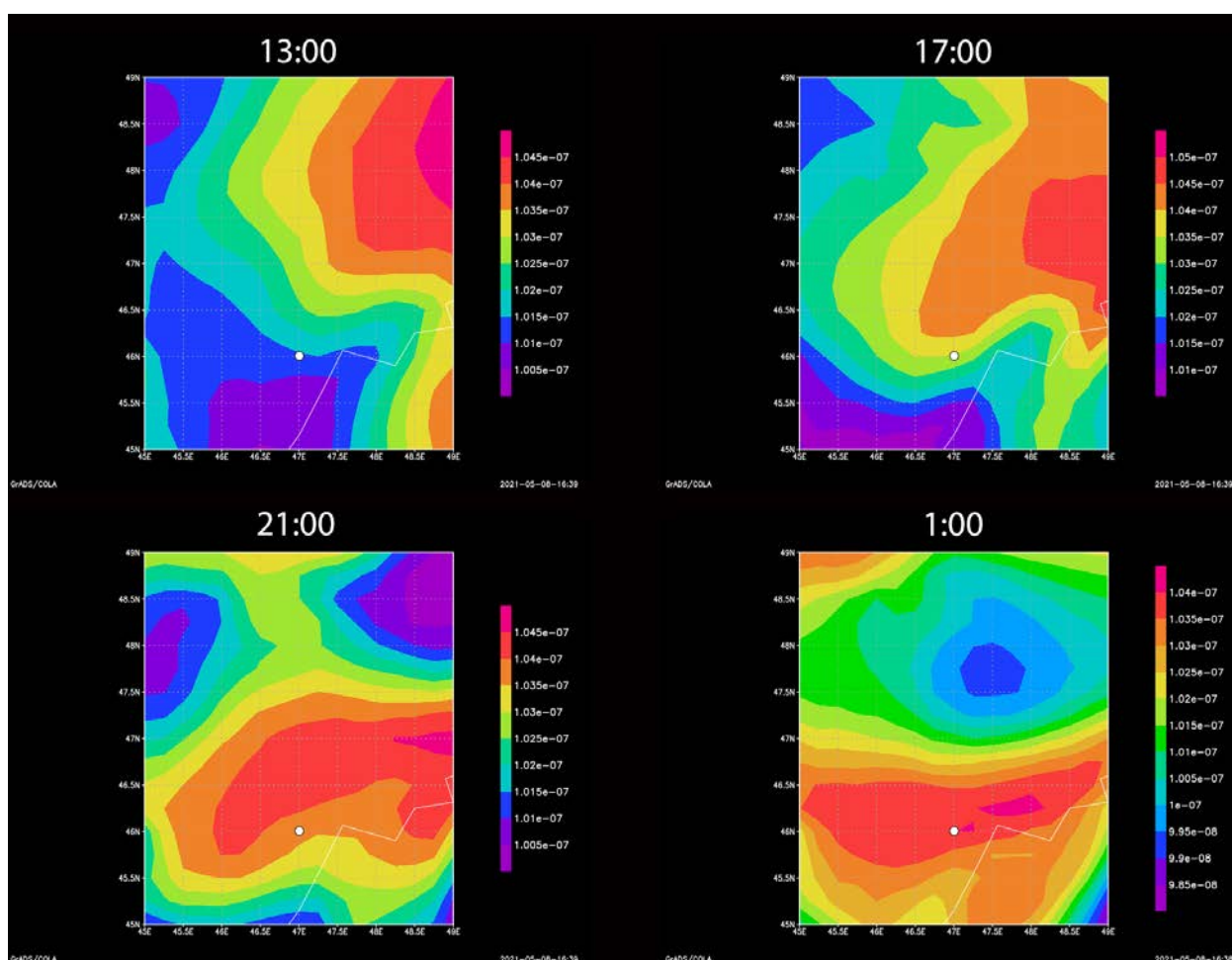


Рис. 30 – ситуация, когда перенос с территории Казахстана влиял на содержание оз

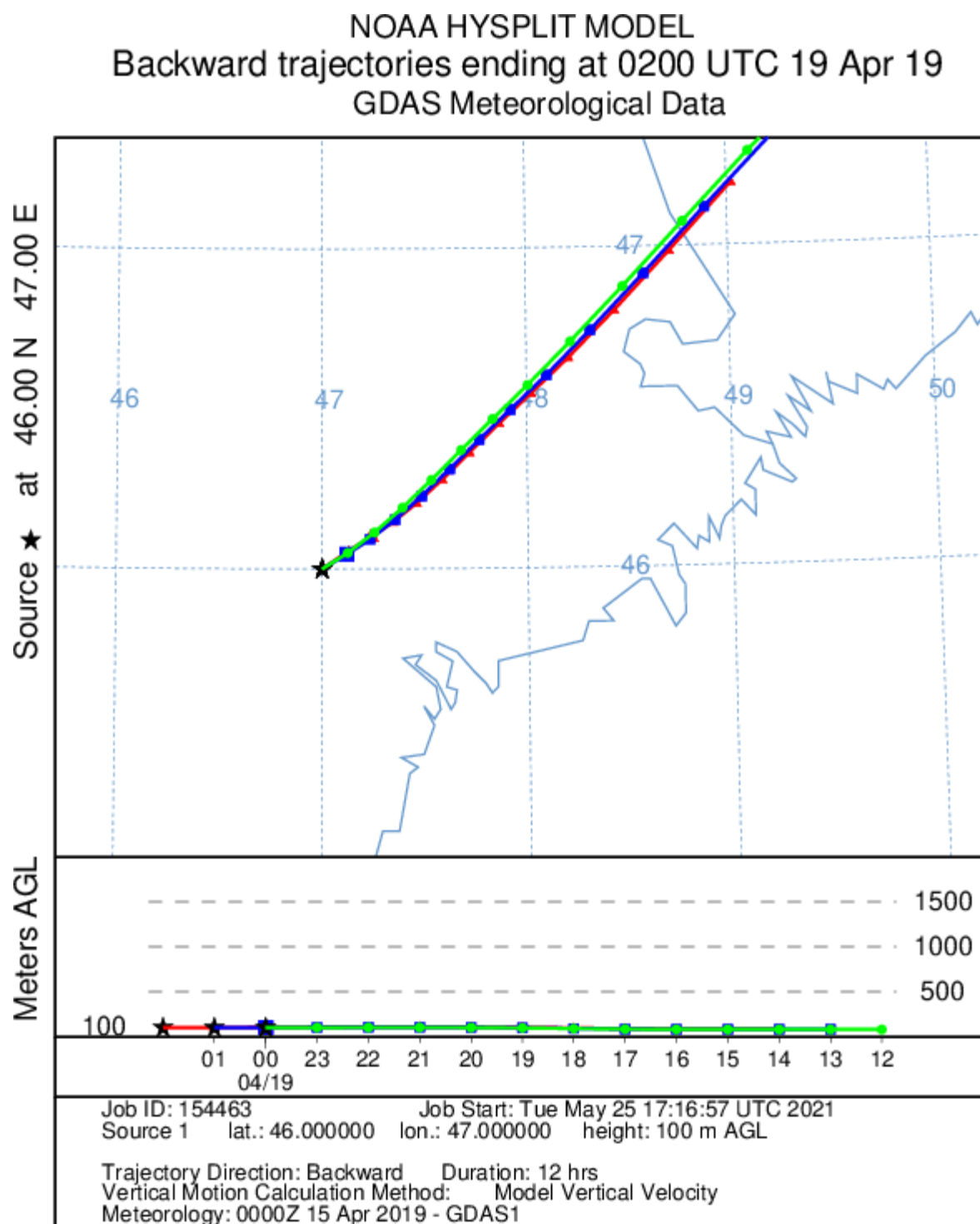


Рис. 31 – Результат работы модели (Виден перенос с территории Казахстана)

В остальных 3 случаях по одному разу можно было наблюдать перенос с территории Украины, с Дагестана, и с Волгоградской области. На рис. 32 Представлена ситуация, когда перенос осуществлялся с территории Украины

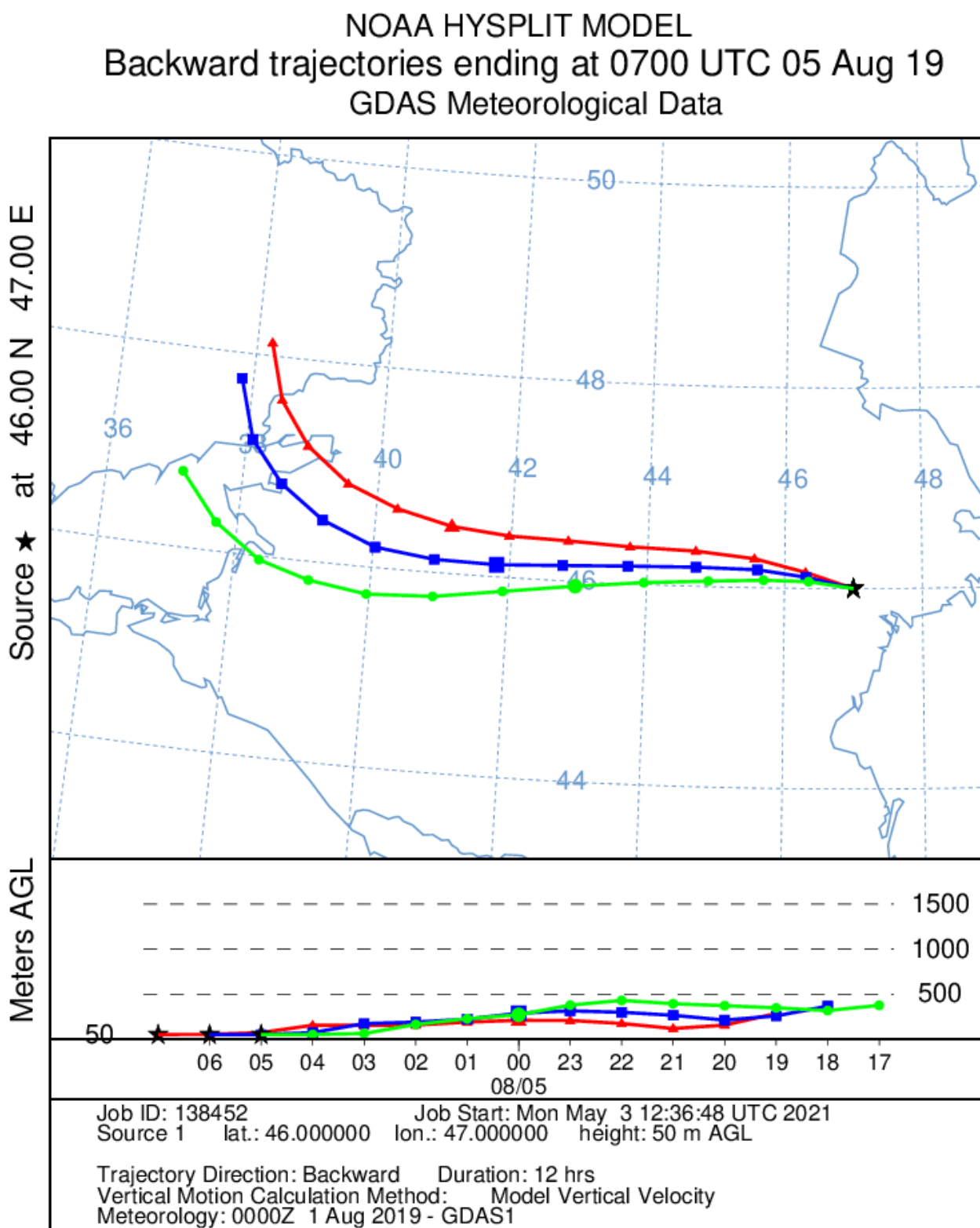


Рис. 32 - Результат работы модели, пронос с территории Украины

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. После оценки данных реанализа ERA-5 можно сказать, что содержание озона в приземном воздухе Европейской территории РФ увеличивается в течение первых двух десятилетий XXI века, особенно в последние 5 лет.
2. В летний и осенний перенос основную роль в формировании озонового загрязнения играют локальные факторы фотохимической продукции, а в зимне-весенний период важную роль играют процессы атмосферного переноса.
3. Влияние предвестников приземного озона в большей степени определяется ролью выбросов окислов азота в крупных городах, чем влияем выбросов метана и летучих органических соединений.
4. Крупные города оказывали влияние на исследуемые точки, находящиеся в пригородах достаточно часто для Москвы это 43,5%, для Санкт-Петербурга 30,6%, в обоих случаях такая картина чаще наблюдалась осенью.
5. В 40,86% случаев для Санкт-Петербурга наблюдался перенос воздушных масс с высоким содержанием озона из Европы. Для пункта, находящегося на берегу Каспийского моря в 53,03% случаев воздушная масса с высоким содержанием озона перемещалась с территории Казахстана

Список использованной литературы

1. Hjlbrekke A.G., Solberg S. Ozone measurements 2000. Norwegian Institute for Air Reseach: Kjeller. EMEP/CCC-Report 5/2002
2. Bates, David V., Ambient Ozone and Mortality. Epidemiology 2005; 16 (4): 427-429.
3. Alexandros Gryparis, Bertil Forsberg at. al. Acute Effects of Ozone on Mortality from the "Air Pollution and Health:A European Project Approach" Am. J. Respir. Crit. Care Med. 2004; (170): 1080-1087.
4. Павлова О.Е. Озониндуцированные изменения в системе крови. Материалы VI научно-практической конференции по проблемам физического воспитания учащихся "Человек, здоровье, физическая культура и спорт в изменяющемся мире". – Коломна, 1996; 154-155.
5. Martuzzi M., Mitis F., at. al. Health impact of PM10 and ozone in 13 Italian cities WHO 2006.(<http://www.euro.who.int/pubrequest>.)
6. Aimen K. Farraj, Mehdi S. Hazari at. al. Overt and Latent Cardiac Effects of Ozone Inhalation 18 in Rats: Evidence for Autonomic Modulation and Increased Myocardial Vulnerability Environmental Health Perspectives 2012; 120 (3): 348-354.
7. Звягинцев А.М., Блюм О.Б., Глазкова А.А., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Миллер Е.А., Миляев В.А., Попиков А.П., Семутникова Е.Г., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю. Аномалии концентраций малых газовых составляющих в воздухе европейской части России и Украины летом 2010 г.. Оптика атмосферы и океана 2011; 24 (07): 582-588
8. <http://ifaran.ru/messaging/forum/news-details.html?id=7134>
<http://ifaran.ru/docs/theses.pdf>
9. Ревич Б.А. Волны жары и смертность населения.
<http://www.polit.ru/research/2010/11/15/demoscope439.html>

10. Васильева О.С., Гусаков А.А. Влияние задымления атмосферного воздуха в период аномальной жары на показатели заболеваемости и смертности по причине острых и хронических болезней дыхательной системы. Пульмонология 2011; (4): 38-43.
11. Агентство по охране окружающей среды США – US EPA – Environment Protection Agency <http://www.epa.gov>, www.epa.gov/airnow.
12. <http://www.eea.europa.eu/maps/ozone/map>
13. Zanis P., T. Trickl, A. Stohl, H. Wernli, O. Cooper, C. Zerefos, H. Gaeggeler, C. Schnabel, L. Tobler, P. W. Kubik, A. Priller, H. E. Scheel, H. J. Kanter, P. Cristofanelli, C. Forster, P. James, E. Gerasopoulos, A. Delcloo, A. Papayannis, and H. Claude. Forecast, observation and modelling of a deep stratospheric intrusion event over Europe // Atmos. Chem. Phys. 2003. V. 3. P. 763-777
14. Ivanova A.R., Chakina N.P., Kuznetsova I.N. The stratospheric intrusion possible contribution to the surface ozone variability in the Kola Peninsula. - Proc. XX Quadr. Ozone Symp. Kos, Greece. 2004. P. 882-883
15. Lin M., Fiore A.M., Cooper O.R., Horowitz L.W., Langford A.O., Levy II H., Johnson B.J., Naik V., Oltmans S.J., and Senff C.J. Springtime high surface ozone events over the western United States: Quantifying the role of stratospheric intrusions // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, D00V22; doi:10.1029/2012JD018151
16. Logan J.A., Prather M.J., Wofsy W.C., and McElroy M.B. Tropospheric chemistry: a global perspective // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 7210-7254.
17. Mauzerall D.L., Jacob D.J., Fan S.-M., Bradshaw J.D., Gregory G.L., Sachse G.W., Blake D.R. Origin of tropospheric ozone at remote high northern latitudes in summer // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. No. D2. P. 4175-4188
18. Seinfeld J.H. Urban air pollution: State of the science // Science. 1989. V. 243. P. 745-752.

- 19.NEGTAP 2001. - Transboundary air pollution: Acidification, eutrophication and ground-level ozone in UK // Edinburgh: CEH. 2001. 314 p.
- 20.Connan, O., K. Smith, C. Organo, L. Solier, D. Maro, and D. Hébert, 2013: Comparison of RIMPUFF, HYSPLIT, ADMS atmospheric dispersion model outputs, using emergency response procedures, with ⁸⁵Kr measurements made in the vicinity of nuclear reprocessing plant. *J. Environ. Radioact.*, 124, 266–277, doi:10.1016/j.jenvrad.2013.06.004.
- 21.Bowyer, T. W., R. Kephart, P. W. Eslinger, J. I. Friese, H. S. Miley, and P. R. J. Saey, 2013: Maximum reasonable radioxenon releases from medical isotope production facilities and their effect on monitoring nuclear explosions. *J. Environ. Radioact.*, 115, 192–200, doi:10.1016/j.jenvrad.2012.07.018
- 22.Jeong, S., Y.-K. Hsu, A. E. Andrews, L. Bianco, P. Vaca, J. M. Wilczak, and M. L. Fischer, 2013: A multitower measurement network estimate of California's methane emissions. *J. Geophys. Res.*, 118, 11 339–11 351, doi:10.1002/jgrd.50854
- 23.Rolph, G. D. and Coauthors, 2009: Description and verification of the NOAA Smoke Forecasting System: The 2007 fire season. *Wea. Forecasting*, 24, 361–378, doi:10.1175/2008WAF2222165.1
- 24.Escudero, M., A. Stein, R. R. Draxler, X. Querol, A. Alastuey, S. Castillo, and A. Avila 2011: Source apportionment for African dust outbreaks over the Western Mediterranean using the HYSPLIT model. *Atmos. Res.*, 99 (3–4), 518–527, doi:10.1016/j.atmosres.2010.12.002.
- 25.Gaiero, D. M., and Coauthors, 2013: Ground/satellite observations and atmospheric modeling of dust storms originated in the high Puna-Altiplano deserts (South America): Implications for the interpretation of paleo-climatic archives. *J. Geophys. Res.*, 118, 3817–3831, doi:10.1002/jgrd.50036.
26. Stunder, B. J. B., J. L. Heffter, and R. R. Draxler, 2007: Airborne volcanic ash forecast area reliability. *Wea. Forecasting*, 22, 1132–1139, doi:10.1175/WAF1042.1

27. Efstathiou, C., S. Isukapalli, and P. Georgopoulos, 2011: A mechanistic modeling system for estimating large-scale emissions and transport of pollen and co-allergens. *Atmos. Environ.*, 45, 2260–2276, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.12.008.
28. Chen, B., A. F. Stein, P. Guerrero Maldonado, A. M. Sanchez de la Campa, Y. Gonzalez-Castanedo, N. Castell, and J. D. de la Rosa, 2013: Size distribution and concentrations of heavy metals in atmospheric aerosols originating from industrial emissions as predicted by the HYSPLIT model. *Atmos. Environ.*, 71, 234–244, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.02.013.
29. Медведева, С. А. Физико-химические процессы в техносфере : учебное пособие / С. А. Медведева, С. С. Тимофеева. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2017. – 225 с.
30. Андрианова М. Ю. Физико-химические основы природных и антропогенных процессов в техносфере: учеб. пособие / М. Ю. Андрианова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 192 с.
31. <https://www.activestudy.info/zagryaznenie-biosfery-oksidami-azota/> © Зооинженерный факультет МСХА
32. Воробьева, Л.Б. Физико-химические процессы в техносфере [Текст] / Л.Б. Воробьева, С.А. Степанова: Учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА. – 2006. – 74 с.
33. Stunder, B. J. B., 1996: An assessment of the quality of forecast trajectories. *J. Appl. Meteor.*, 35, 1319–1331, doi:10.1175/1520-0450(1996)035<1319:AAOTQO>2.0.CO;2.
34. Stunder, J. L. Heffter, and R. R. Draxler, 2007: Airborne volcanic ash forecast area reliability. *Wea. Forecasting*, 22, 1132–1139, doi:10.1175/WAF1042.1.
35. Borge, R., J. Lumbreras, S. Vardoulakis, P. Kassomenos, and E. Rodriguez, 2007: Analysis of long-range transport influences on urban PM10 using two stage atmospheric trajectory clusters. *Atmos. Environ.*, 41, 4434–4450, doi:10.1016/j.atmosenv.2007.01.053.

- 36.Karaca, F., and F. Camci, 2010: Distant source contributions to PM₁₀ profile evaluated by SOM based cluster analysis of air mass trajectory sets. *Atmos. Environ.*, 44, 892–899, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.12.006.
- 37.Markou, M. T., and P. Kassomenos, 2010: Cluster analysis of five years of back trajectories arriving in Athens, Greece. *Atmos. Res.*, 98, 438–457, doi:10.1016/j .atmosres.2010.08.006.
- 38.Baker, J., 2010: A cluster analysis of long range air transport pathways and associated pollutant concentrations within the UK. *Atmos. Environ.*, 44, 563–571, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.10.030.
- 39.Rolph, G. D., R. R. Draxler, and R. G. de Pena, 1992: Modeling sulfur concentrations and depositions in the United States during ANATEX. *Atmos. Environ.*, 26A, 73–93, doi:10.1016/0960-1686(92)90262-J.
- 40.Witham, C. S., M. C. Hort, R. Potts, R. Servranckx, P. Husson, and F. Bonnardot, 2007: Comparison of VAAC atmospheric dispersion models using the 1 November 2004 Grimsvötn eruption. *Meteor. Appl.*, 14, 27–38, doi:10.1002/met.3.
- 41.Tupper, A., J. Davey, P. Stewart, B. Stunder, R. Servranckx, and F. Prata, 2006: Aircraft encounters with volcanic clouds over Micronesia, Oceania, 2002/03. *Aust. Meteor. Mag.*, 55, 289–299.
- 42.Smith, C. D., 1950: The widespread smoke layer from Canadian forest fires during late September 1950. *Mon. Wea. Rev.*, 78, 180–184, doi:10.1175/1520 -0493(1950)078<0180:TWSLFC>2.0.CO;2.
- 43.Rolph, G. D., and Coauthors, 2009: Description and verification of the NOAA Smoke Forecasting System: The 2007 fire season. *Wea. Forecasting*, 24, 361–378, doi:10.1175/2008WAF2222165.1.
- 44.Ngan, F., A. Stein, and R. Draxler, 2015: Inline coupling of WRF–HYSPLIT: Model development and evaluation using tracer experiments. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 54, 1162–1176, doi:10.1175/JAMC-D-14-0247.1.

- 45.Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населённых мест. Гигиенические нормативы 2.1.6.1338-03 3 декабря 2013 года.
- 46.Рекомендации ВОЗ Рекомендации ВОЗ по качеству по качеству воздуха, касающиеся воздуха, касающиеся твердых частиц, озона, двуокиси азота и двуокиси серы Глобальные обновленные данные Глобальные обновленные данные 2005 год
- 47.WMO/UNEP, 1994. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994. Ozone Report No. 37
48. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. - Л.: Гидрометеиздат. 1973. 292 с
- 49.Pan L.L., Randel W.J., Gary B.L., Mahoney M.J., Hintsa E.J.. Definitions and sharpness of the extratropical tropopause: A trace gas perspective // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. P. D23103, doi:10.1029/2004JD004982.
- 50.Wild O. Modelling the global tropospheric ozone budget: exploring the variability in current models // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7. P. 2643–2660.
51. Haagen-Smit A.J. Chemistry and physiology of Los Angeles Smog // Ind. and Eng. Chem. Res. 1952. V. 44. P. 1342–1346.
- 52.Jacob D.J. Introduction to Atmospheric Chemistry. - Princeton, NJ: University Press. 1999. 266 p
- 53.Бримблкомб П. Состав и химия атмосферы // М.: Мир, 1988, 352 с. // Brimblecombe P. Air. Composition and Chemistry // Cambridge: Cambridge University Press. 1986.
- 54.<https://nauka.club/khimiya/ozon.html>
- 55.<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>
- 56.<https://www.ecmwf.int/en/about>