



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Моделирование переноса пассивных трассеров в атмосфере»

Исполнитель Собачкина Мария Александровна
(фамилия, имя, отчество)

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

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

«19» июня 2025 г.

Санкт-Петербург

2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	1
1. ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ	3
1.1 Виды и источники загрязнений	3
1.2 РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ	4
1.3 МЕХАНИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ	4
1.4 ХИМИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ	7
1.5 ТЕПЛОВОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ	8
1.6 ВТОРИЧНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ	10
2. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ	14
2.2 Монотонные схемы	16
2.3 МЕТОД КОРРЕКЦИИ ПОТОКОВ БОРИСА-БУКА	18
3 ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ	22
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	29
СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	30
ПРИЛОЖЕНИЯ	32

Введение

В современной науке проблемы экологического характера стоят как никогда остро. Охрана окружающей среды от загрязнений – одна из наиболее актуальных задач в настоящее время.

Моделирование переноса пассивных трассеров в атмосфере представляется важным аспектом для метеорологии по причине того, что оно охватывает множество актуальных на сегодняшний день задач, таких как:

- Прогнозирование погодных условий

Распространение аэрозолей и химических веществ может влиять на атмосферную циркуляцию, облачность и осадки. Изучение таких эффектов помогает улучшить точность метеорологических прогнозов.

- Оценка влияния климатических изменений

Моделирование переноса пассивных трассеров в атмосфере используется для анализа процессов, связанных с изменениями климата.

- Обнаружение загрязняющих веществ и мониторинг их распространения

Моделирование перемещения частиц помогает в организации эффективного мониторинга загрязняющих веществ в реальном времени. Это позволяет реагировать на выбросы загрязнителей и минимизировать их воздействие на окружающую среду.

- Техника принятия решений

Понимание процессов переноса примесей в атмосфере позволяет принимать более обоснованные решения относительно экологии, сельского хозяйства, городского планирования и других областей, подверженных влиянию загрязняющих веществ

- Перенос опасных веществ при экологических катастрофах

В случае аварийных выбросов токсичных или радиоактивных веществ моделирование их переноса позволяет оценить возможное воздействие на население и окружающую среду. Модели могут использоваться для планирования эвакуации и ликвидации последствий.

1. Загрязнение атмосферы

1.1 Виды и источники загрязнений

В современной науке проблемы экологического характера стоят как никогда остро. Охрана окружающей среды от загрязнений – одна из наиболее актуальных задач в настоящее время.

Загрязнение атмосферы – это распространение в атмосферном воздухе нехарактерных для него веществ, либо изменение естественной концентрации уже находящихся в нём веществ под действием природных или антропогенных факторов.

Загрязнение атмосферы делится на два типа: естественное и антропогенное, каждый из которых имеет свои источники. Естественные источники включают вулканическую активность, лесные и степные пожары, пыльные бури, а также цветение растений. Они выделяют такие примеси, как пыль растительного, вулканического и космического происхождения, продукты разрушения почвы, частицы морской соли, а также дым и газы от пожаров. Эти источники, как правило, охватывают большие территории, но действуют недолго. Уровень естественного загрязнения считается фоновым и остается относительно стабильным.

Антропогенные (техногенные) источники связаны в основном с промышленными предприятиями и автомобильным транспортом, и их разнообразие значительно выше. В настоящее время именно антропогенное загрязнение преобладает над естественным. Его масштаб зависит от объема и состава вредных выбросов, высоты их распространения, а также от климатических факторов, влияющих на перемещение, рассеивание и химические превращения загрязняющих веществ.

Загрязнение атмосферы может происходить одновременно в виде нескольких процессов, в которых природа агентов принципиально отличается. К наиболее значимым из них можно отнести следующие формы загрязнения:

- радиоактивное;
- механическое (аэрозольное);
- химическое;
- тепловое (энергетическое);
- вторичное, агенты которого образуются в ходе физико-химических процессов, протекающих под воздействием техногенных факторов непосредственно в атмосфере.

Подобное деление в значительной мере носит условный характер. Например, радиоактивное загрязнение атмосферы часто неразрывно связано с ее механическим загрязнением, а вторичное загрязнение возникает на основе химического.

1.2 Радиоактивное загрязнение

Радиоактивное загрязнение воздуха вызвано наличием в нем нестабильных изотопов — радионуклидов. Распространение этого типа загрязнения в глобальных масштабах в основном связано с эпохой активных наземных и атмосферных ядерных испытаний. Оказавшиеся в воздушной среде радиоактивные частицы быстро разносились ветром на большие расстояния.

Попадание радионуклидов в атмосферу также происходит в ходе штатной эксплуатации ядерных реакторов, добычи и переработки уранового топлива. Существенный вклад вносит и использование в промышленности минерального сырья с природной радиоактивностью. Кроме того, загрязнение возникает при применении некоторых видов фосфорных и калийных удобрений, часть которых в виде пыли может подниматься в атмосферу.

1.3 Механическое загрязнение

Механическое загрязнение атмосферы обусловлено присутствием в ней различных частиц техногенного происхождения, которые при анализе их воздействия на окружающую среду обычно рассматриваются как химически

инертные. Подобное искусственное отделение физических свойств аэрозолей от присущих им же химических свойств необходимо для выделения ряда важных эффектов.

Поступление в атмосферу техногенных аэрозолей происходит в результате самых различных видов человеческой деятельности: выбросов промышленных предприятий; взрывных работ; дефляции (ветровой эрозии), спровоцированной нарушением почвенно-растительного покрова.

Общая масса постоянно присутствующих в атмосфере техногенных аэрозолей огромна, причем в пределах тропосферы техногенные аэрозоли оседают или разрушаются относительно быстро, в стратосфере они могут существовать годами.

В глобальном масштабе, в течение длительного времени, совпадающем с периодом интенсивного развития промышленности и хозяйственного освоения новых территорий, отмечается устойчивая тенденция увеличения количества техногенных аэрозолей в атмосфере. В конце прошлого века оно уже достигало 10 млн тонн.

Высокая концентрация аэрозольных частиц в атмосфере способна задерживать существенную часть солнечной радиации, что может вызывать понижение температуры у земной поверхности. Наиболее ярко этот эффект проявлялся после мощных вулканических извержений, когда выбросы в южном полушарии приводили к заметному похолоданию даже в северных широтах. Подобные последствия могут быть вызваны и антропогенной деятельностью. Особую опасность представляет резкое глобальное похолодание вследствие массивного выброса аэрозолей при ядерных взрывах, которые способны значительно затенить атмосферу.

Влияние на здоровье человека и экосистемы

На сегодняшний день наиболее подробно изучено воздействие механического загрязнения воздуха на человека. Доказано, что современный уровень аэрозольного загрязнения в городах провоцирует широкий спектр заболеваний. По оценкам, около 5% случаев рака легких в мире связаны

именно с этим фактором. Воздействие часто сказывается на дыхательной и сердечно-сосудистой системах. Согласно многочисленным исследованиям, загрязнение воздуха мелкими частицами связано с рядом серьезных последствий для здоровья:

повышенный риск ранней смертности у пациентов с кардиологическими и респираторными патологиями

- случаи инфарктов без летального исхода
- аритмии и другие нарушения работы сердца
- ухудшение течения астмы
- снижение работоспособности легких
- усиление проявлений респираторных заболеваний, включая

воспаление дыхательных путей, приступы кашля и одышку.

В группе особого риска находятся: пациенты с хроническими болезнями сердца и легких, дети и пожилые люди, представители уязвимых социальных групп и национальных меньшинств. Их повышенная восприимчивость обусловлена либо физиологической чувствительностью, либо постоянным контактом с загрязненным воздухом.

В отличие от медицинских аспектов, экологические последствия механического загрязнения исследованы недостаточно. Переносимые воздушными потоками частицы способны преодолевать значительные расстояния, после чего осаждаются на поверхность земли или в водные объекты. Химический состав этих частиц определяет характер их воздействия на окружающую среду. При оседании они могут вызывать закисление водоемов, включая озера и малые водотоки, что приводит к нарушению водных экосистем. В прибрежных зонах и устьях крупных рек это провоцирует изменение баланса биогенных элементов, влияя на продуктивность водных систем.

Почвенный покров также подвергается негативному воздействию - оседающие частицы способствуют постепенному истощению запасов

питательных веществ, что ухудшает плодородие земель. Особую опасность это представляет для чувствительных лесных массивов и сельскохозяйственных угодий, где наблюдается снижение продуктивности растительного покрова. Биологическое разнообразие экосистем претерпевает изменения из-за нарушения естественных условий обитания видов. Кроме того, содержащиеся в частицах химические соединения усугубляют последствия кислотных осадков, усиливая их разрушительное воздействие на природные комплексы. Такой комплексный характер влияния делает проблему атмосферного переноса частиц особо значимой для экологической безопасности обширных территорий.

Наблюдаемое увеличение концентрации техногенных аэрозолей также приводит к снижению прозрачности атмосферы в видимой части спектра — явлению, известному как «глобальное затемнение».

1.4 Химическое загрязнение

Химическое загрязнение атмосферы представляет собой процесс попадания в воздушную среду химически активных соединений, который неразрывно связан с историей промышленного прогресса. Данный вид загрязнения характеризуется чрезвычайным разнообразием источников и загрязняющих веществ. Уже в первые десятилетия XX века это антропогенное влияние приобрело планетарный характер - токсичные соединения стали обнаруживаться повсеместно, включая территории, расположенные за тысячи километров от промышленных центров. Наряду с промышленными предприятиями, важнейшим источником загрязнения стал автомобильный транспорт.

Среди всех видов антропогенного воздействия на атмосферу именно химическое загрязнение считается наиболее опасным последствием техногенной трансформации земной газовой оболочки. Массовые выбросы токсичных соединений оказывают негативное влияние на флору и фауну,

вызывают снижение продуктивности сельскохозяйственных растений и нарушают структурно-функциональную организацию природных экосистем.

Несмотря на сложность точной глобальной оценки экологического ущерба от химического загрязнения (из-за ограниченности данных), его роль как одного из ключевых факторов техногенного воздействия на планету не вызывает сомнений. Следы опасных антропогенных веществ обнаруживаются в живых организмах по всему миру, включая отдаленные регионы Антарктиды

Прогнозируемые последствия нарастающей интенсивности химического загрязнения атмосферного воздуха находят свое наиболее яркое отражение в данных мониторинга, проводимого в урбанизированных зонах промышленно развитых регионов. Согласно исследованиям отечественных ученых, токсичные выбросы в атмосферу городских агломераций ежегодно приводят к преждевременной гибели десятков тысяч человек, составляя при этом около 17% от общего показателя городской смертности. В мировом масштабе, по предварительным и пока еще фрагментарным оценкам экспертов, воздействие промышленных выбросов становится причиной преждевременной смерти не менее двух миллионов человек в год, причем в ближайшей перспективе этот показатель с высокой долей вероятности будет демонстрировать устойчивую тенденцию к росту. Глобальные усилия по регулированию промышленных выбросов в значительной степени нивелируются процессами стремительной урбанизации и хозяйственного освоения новых территорий, что неизбежно сопровождается появлением многочисленных нерегулируемых источников загрязнения окружающей среды.

1.5 Тепловое загрязнение

Феномен теплового загрязнения атмосферы обусловлен прямым тепловым воздействием антропогенной деятельности на воздушную среду. Значительная доля потребляемых человечеством энергетических ресурсов

трансформируется в тепловую энергию, рассеиваемую в окружающем пространстве. В этой связи очевидно, что дальнейшая интенсификация энергопотребления приведет к пропорциональному увеличению теплового загрязнения, что в научной литературе часто обозначается термином "энергетическое загрязнение". Проведенные расчеты свидетельствуют, что при сохранении текущих темпов роста энергопотребления (4-10% в год) уже через 100-200 лет количество антропогенного тепла достигнет величин, сопоставимых с радиационным балансом всей континентальной поверхности Земли. Подобный сценарий чреват климатическими изменениями глобального масштаба, последствия которых могут превзойти даже потенциальные эффекты от парникового явления.

Исследования процессов теплового загрязнения в настоящее время сосредоточены преимущественно на территориях мегаполисов, где его интенсивность уже достигла уровней, представляющих потенциальную угрозу для здоровья населения. Характерным проявлением данного феномена является формирование над крупными городами куполообразных скоплений нагретого воздуха, известных как "тепловые острова" или "тепловые шапки". Хотя в настоящее время это явление рассматривается как локальное и временное, устойчивое существование таких тепловых аномалий над многими городами стало уже привычным явлением. Относительно слабая изученность данной проблемы объясняется тем, что большинство промышленно развитых стран расположено в регионах, где естественные температурные показатели значительную часть года остаются ниже оптимальных для человека значений. В таких условиях незначительное повышение температуры в холодный сезон не воспринимается как негативный фактор. Однако в период летней жары дополнительный тепловой вклад создает серьезные проблемы, особенно когда тепловая шапка начинает препятствовать нормальному воздухообмену между городом и окружающими территориями. Это приводит к аккумуляции в приземном слое атмосферы различных загрязняющих веществ (как химических, так и механических) и создает благоприятные условия для

формирования опасных вторичных загрязнений, таких как фотохимический смог.

Современные тенденции указывают на потенциальную возможность глобализации теплового загрязнения атмосферы и усиления его негативных последствий. Основным драйвером этого процесса выступает продолжающаяся урбанизация, которая в обозримом будущем охватит большую часть территорий, пригодных для проживания человека. Отдельные страны уже реализуют проекты по освоению прибрежных акваторий посредством создания искусственных островов. При этом масштабы тепловых аномалий существенно превышают границы собственно городской застройки - например, тепловая шапка над Москвой распространяется на расстояние, в 3–4 раза превышающее радиус самого города. Дальнейшая урбанизация неизбежно приведет к укрупнению таких образований, которые в перспективе могут приобрести не только региональный, но и континентальный масштаб. Это выведет негативные последствия теплового загрязнения на качественно новый, пока еще недостаточно изученный уровень. В частности, можно прогнозировать значительное воздействие теплового загрязнения от урбанизированных территорий на сохранившиеся природные экосистемы, что может стать одним из важнейших факторов их постепенной деградации.

1.6 Вторичное загрязнение

Под вторичным загрязнением понимают процесс формирования экологически опасных соединений в результате физико-химических и биологических преобразований в окружающей среде. Этот феномен развивается по следующей схеме:

1. Первичная стадия: антропогенная деятельность приводит к выбросу так называемых "первичных загрязнителей"
2. Вторичная стадия: эти вещества, взаимодействуя между собой и подвергаясь воздействию природных факторов, преобразуются

в новые соединения, часто обладающие значительно более высокой экологической опасностью

Образующиеся таким образом "агенты вторичного загрязнения", несмотря на свое техногенное происхождение, формируются вне какого-либо контроля - как экологического, так и технологического. Эти процессы отличаются значительно более сложной прогнозируемостью по сравнению с первичным загрязнением, что приводит к тому, что проблема обычно привлекает внимание только после проявления очевидных негативных последствий.

Классический пример - образование фотохимического смога. Это высокотоксичные аэрозоли, формирующиеся под действием солнечной радиации из первичных загрязнителей (преимущественно оксидов азота и углеводородов).

Актуальность проблемы вторичного загрязнения постоянно возрастает в связи с:

- Поступлением в атмосферу новых, ранее не встречавшихся соединений
- Кажущейся безопасностью многих первичных загрязнителей (они могут быть химически инертны и малотоксичны)
- Сложностью прогнозирования трансформационных процессов в условиях огромного разнообразия техногенных веществ

Особую сложность представляет многостадийность процессов трансформации (а не просто двухэтапная схема). Практически все атмосферные вещества (за исключением инертных газов) способны к превращениям в соединения с иными свойствами.

Глобализация первичного (химического и механического) загрязнения неизбежно приводит к глобализации вторичных процессов. Эти стихийно развивающиеся трансформации постепенно формируют новую геохимическую систему планеты. Их изучение и разработка методов прогнозирования (не говоря уже о контроле) представляет собой

исключительно сложную, но критически важную научную задачу современности.

В настоящее время основные усилия по предотвращению глобального загрязнения атмосферы сосредоточены на ограничении промышленных выбросов и ужесточении контроля за эмиссией загрязняющих веществ. Разрабатываются и внедряются новые технологии, направленные как на изменение производственных процессов, так и на совершенствование систем очистки выбросов. Хотя на уровне отдельных предприятий эти меры дают заметный положительный эффект, глобальные показатели загрязнения атмосферы продолжают расти практически по всем параметрам, за исключением радиоактивного загрязнения.

Этот парадокс объясняется тем, что снижение выбросов носит преимущественно относительный характер - уменьшение количества загрязняющих веществ рассчитывается на единицу продукции, тогда как общий объем производства продолжает увеличиваться. Даже внедрение наилучших доступных технологий не приводит к сокращению совокупных выбросов в условиях постоянного роста промышленного производства. Кроме того, современные системы очистки применяются в основном на крупных предприятиях, в то время как малый и средний бизнес, а тем более индивидуальная деятельность, остаются практически вне поля экологического регулирования.

Особую проблему представляет так называемое диффузное загрязнение, возникающее от множества мелких и рассредоточенных источников. Традиционные методы очистки, эффективные для промышленных выбросов, оказываются неприменимыми в этом случае. С ростом населения и урбанизации значение диффузного загрязнения только возрастает - каждый новый дом, автомобиль или единица техники вносит свой вклад в общее загрязнение атмосферы.

В этих условиях наиболее перспективным подходом представляется создание системы распределенных природных поглотителей загрязнения.

Зеленые насаждения, выполняющие роль естественных воздушных фильтров, демонстрируют высокую эффективность в очистке приземного слоя атмосферы. Например, один гектар леса способен за сутки очистить до полумиллиона кубических метров воздуха от значительной части загрязняющих веществ. Этот принцип уже находит применение в городском планировании, где особое внимание уделяется озеленению территорий вдоль транспортных магистралей и в промышленных зонах.

Технические решения по принудительной очистке городского воздуха, такие как крупномасштабные системы фильтрации, остаются пока недостижимыми из-за огромных финансовых затрат, технологических ограничений и потенциального негативного воздействия на экосистемы. Таким образом, несмотря на определенные успехи в снижении локальных выбросов, глобальная проблема загрязнения атмосферы требует комплексного подхода, сочетающего технологические инновации с максимальным использованием природного потенциала самоочищения.

Так, зависимости от типа и цвета загрязняющих частиц, они могут оказывать охлаждающий или нагревающий эффект на климат. Роль пассивных трассеров в атмосфере значительна. Некоторые частицы служат ядрами конденсации паров воды в облаках, так что их отсутствие значительно бы изменило круговорот воды, и, следовательно, и климат планеты.

2. Методы прогнозирования

2.1 Уравнения мелкой воды

Одной из центральных проблем современной физики атмосферы является математическое моделирование изменчивости газового и аэрозольного состава атмосферы, а также оценка влияния атмосферных примесей на окружающую среду. Атмосфера представляется сложной динамической системой с протекающими в ней различными динамическими и физико-химическими процессами, обусловленными как атмосферной циркуляцией, так и трансформацией газовых и аэрозольных примесей. Основные механизмы – это химические и фотохимические реакции, протекающие в газовой и жидкой фазах, а также кинетические процессы формирования и эволюции аэрозолей. Все эти процессы взаимосвязаны между собой, и поэтому их целесообразно рассматривать в рамках единой модели. В зависимости от пространственно-временного масштаба рассматриваемых процессов используются модели различной степени детализации.

Далее в работе будет рассматриваться математическая модель переноса пассивных примесей в атмосфере. Модель основана на полуэмпирическом уравнении турбулентной диффузии.

Известно, что атмосферные процессы – это суперпозиция колебаний различных пространственно-временных масштабов. Для задач физики атмосферы характерен широкий спектр атмосферных движений: от микромасштабных (наименьший масштаб – тепловое движение молекул) до макромасштабных (наибольший масштаб имеет зональный поток).

Вследствие того, что в атмосфере одновременно существуют движения различных масштабов, можно провести пространственно-временное осреднение уравнений динамики и энергетики так, что в них будут содержаться лишь средние значения физических величин. При этом будут

отфильтрованы те турбулентные движения, масштаб которых меньше пространственного и временного интервалов осреднения.

Эти движения представляют собой флуктуации физических величин по отношению к соответствующим средним движениям.

В атмосферных процессах используются полные уравнения баротропной модели атмосферы. Один из вариантов таких уравнений – уравнения мелкой воды. Для рассматриваемой среды уравнения движения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{\partial \Phi}{\partial x} + lv \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial \Phi}{\partial y} - lu\end{aligned}\tag{2.1}$$

Преобразуем уравнения и введём геопотенциал свободной поверхности $\Phi = gh$.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + u \frac{\partial \Phi}{\partial x} + v \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \Phi \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0\tag{2.2}$$

Данные уравнения (2.1 и 2.2) представляют собой замкнутую систему уравнений мелкой воды, они и используются для моделирования атмосферных процессов.

Для моделирования распространения дыма от лесных пожаров к уравнениям модели «мелкой воды» добавлялось ещё и уравнение переноса дыма

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} = q;\tag{2.3}$$

где

S – концентрация примеси;

q – мощность источника примеси.

Как уже отмечалось выше, по космическим снимкам были определены координаты очагов пожара за 01 октября 2011 года и в модели мощность источника, равная случаю полного сгорания древесных материалов, задавалась в точках с этими координатами.

Уравнение (2.3) решается специальными, отличными от решения уравнений модели «мелкой воды», методами. Такой подход связан с тем, что при распространении примеси от источника возникающее поле загрязнения не является гладким и использование стандартных конечно-разностных методов аппроксимации уравнений приводит к ложным осцилляциям и ошибкам, которые, в свою очередь, ведут к неразумным значениям концентрации. Эта проблема известна как «проблема ступеньки» или «задача скачка».

ри численном моделировании подобных задач особую эффективность демонстрируют методы расчета, базирующиеся на физической сущности рассматриваемых процессов.

2.2 Монотонные схемы

Особые сложности возникают при численном представлении ступенчатых профилей, характерных для областей со значительными изменениями параметров в невязких течениях. В таких случаях оптимальным выбором становятся монотонные разностные схемы.

Монотонные схемы представляют собой класс однородных разностных схем, обладающих важным свойством: они строго сохраняют монотонность профиля численного решения. Это означает, что при отсутствии физических источников немонотонности в исходной задаче, разностное решение также не будет содержать искусственных осцилляций или ложных экстремумов. Такое поведение схемы особенно ценно при моделировании задач с ударными

волнами, контактными разрывами и другими особенностями течения, где важно точно воспроизводить резкие изменения параметров без внесения численных искажений.

Физическая обоснованность и устойчивость монотонных схем делают их предпочтительным инструментом для моделирования сложных гидрометеорологических процессов, где требуется высокая точность воспроизведения особенностей потока при сохранении устойчивости вычислительного алгоритма.

Признак монотонности – функция, разложенная в ряд вида: $Y_n = \sum_l \beta_l Y_{n+1}$, монотонна только тогда, когда все $\beta_l \geq 0$.

Различие между монотонными и немонотонными схемами наиболее отчетливо проявляется при расчетах задач с разрывными решениями. В то время как монотонные схемы дают плавное, сглаженное решение, немонотонные приводят к характерным осцилляциям вблизи разрывов - так называемой "разболтке", которая не является признаком неустойчивости, а представляет собой фундаментальное свойство таких схем.

Аналогичные проблемы возникают при расчетах быстропеременных решений на относительно грубых сетках, что вынуждает использовать монотонные схемы, несмотря на их ограниченную точность. Однако для гладких решений при достаточно мелком шаге сетки даже немонотонные схемы, включая схемы второго порядка точности, могут сохранять монотонность решения.

Основные сложности с немонотонностью проявляются при работе на грубых сетках и решении многомерных задач, где вычислительные ограничения часто не позволяют использовать достаточно мелкий шаг. В таких условиях монотонные схемы, несмотря на пониженную точность, обеспечивают качественно правильное поведение решения без физически необоснованных осцилляций.

Именно способность сохранять монотонность профиля, обеспечивать хорошее разрешение разрывов и поддерживать приемлемую точность в

гладких областях делает монотонные схемы столь популярными для решения широкого круга прикладных задач газовой динамики и теплообмена, где надежность решения часто важнее максимальной точности.

В работе сначала была использована самая простая монотонная схема – схема Эйлера по времени и схема направленных разностей назад по пространству, которая имеет вид

$$\begin{aligned} & \frac{s_{i,j}^{s+1} - s_{i,j}^s}{\Delta t} + \frac{u_{i,j}^s}{a \cos \varphi} \cdot \begin{cases} \frac{S_{i,j}^s - S_{i-1,j}^s}{\Delta \lambda}, & \text{если } u_{i,j}^s > 0 \\ \frac{S_{i+1,j}^s - S_{i,j}^s}{\Delta \lambda}, & \text{если } u_{i,j}^s < 0 \end{cases} + \\ & + \frac{v_{i,j}^s}{a} \cdot \begin{cases} \frac{S_{i,j}^s - S_{i,j-1}^s}{\Delta \varphi}, & \text{если } v_{i,j}^s > 0 \\ \frac{S_{i,j+1}^s - S_{i,j}^s}{\Delta \varphi}, & \text{если } v_{i,j}^s < 0 \end{cases} = q \end{aligned} \quad (2.4)$$

Для повышения точности решения была применена схема коррекции потоков Бориса-Бука, описанная далее.

2.3 Метод коррекции потоков Бориса-Бука

Данный метод представляет собой развитие схемы предиктор-корректор и предназначен для подавления численных осцилляций в решениях задач с разрывами. Его ключевая особенность — двухэтапная структура с контролируемым введением и последующим ограниченным удалением искусственной вязкости.

На этапе предиктор в схему вносится значительная искусственная диффузия, обеспечивающая устойчивость расчета и подавление высокочастотных колебаний. Затем на этапе корректор вводится

компенсирующая антидиффузия, почти полностью устраняющая добавленное ранее сглаживание. Однако критически важным элементом метода является механизм ограничения антидиффузии, который предотвращает появление новых локальных экстремумов, не допускает усиления существующих минимумов и максимумов и сохраняет физическую положительность решения.

Этот ограничивающий механизм выполняет две принципиальные функции:

- 1) Сохраняет монотонность численного решения, устраняя немонотонные осцилляции (так называемую "дисперсионную рябь"), которые могли возникнуть на этапе предиктор
- 2) Позволяет точно локализовать области разрывов без их избыточного размывания

Метод коррекции потоков особенно эффективен для задач газовой динамики и переноса, где требуется одновременно высокая разрешающая способность в зонах резких градиентов, отсутствие физически необоснованных осцилляций и сохранение монотонности профилей.

Гибкость подхода позволяет адаптировать его как для одномерных, так и для многомерных случаев, хотя реализация ограничителей антидиффузии в многомерных задачах требует дополнительных вычислительных затрат.

Метод коррекции потоков может быть пояснен на примере применения его к одномерному уравнению неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0 \quad (2.5)$$

где

ρ – плотность;

u – скорость в проекции на ось OX

На шаге предиктор для вычисления ρ_j^* используют следующие конечно-разностный алгоритм:

$$\rho_j^* = \rho_j^n - 0.5C(\rho_{j+1}^n - \rho_{j-1}^n) + (v + 0.5C^2)(\rho_{j+1}^n - 2\rho_j^n + \rho_{j-1}^n) \quad (2.6)$$

где

C – величина, равная соотношению $u \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x}$;

v – положительный диффузионный коэффициент.

Обычно $v = 0.125$. Если $v = 0$, получается схема Лакса-Вендроффа.

В принципе антидиффузия на шаге корректор может быть введена следующим образом:

$$\rho_j^{n+1} = \rho_j^* - \mu(\rho_{j+1}^* - 2\rho_j^* + \rho_{j-1}^*) \quad (2.7)$$

где μ – коэффициент антидиффузии.

Возможен очевидный выбор $\mu = v$. Однако, для того чтобы обеспечить консервативность схемы и в случае переменной скорости, полезно ввести в рассмотрение антидиффузионный поток массы

$$f_{j+1/2}(\rho_{j+1}^* - \rho_j^*)$$

$$f_{j-1/2}(\rho_j^* - \rho_{j-1}^*) \quad (2.8)$$

Сущность схемы коррекции потоков состоит в замене $f_{j+1/2}$ и $f_{j-1/2}$ на аналоги для того, чтобы предотвратить образование на стадии введения антидиффузии новых максимумов и минимумов. На конечной стадии выражение) заменяется на

$$\rho_j^{n+1} = \rho_j^* - f_{j+1/2}^c + f_{j-1/2}^c \quad (2.9)$$

Схема устойчива при выполнении условия $C = u \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} < 0.5$.

Значение $\mu = \nu = 0.125$ близко к оптимальному, так как при этом обеспечивается минимум диффузионной и дисперсионной ошибок. Следует отметить полное отсутствие осцилляций.

Согласно методу Бориса и Бука рекомендуется выбирать ν и μ в (2.7) так, чтобы дисперсионные ошибки, возникающие при дискретизации уравнений, были минимальны.

Метод коррекции потоков применим и в случае многих переменных.

3 Численные эксперименты

Для выполнения практической части выпускной квалификационной работы было взято поле геопотенциала.

Фрагмент начальных данных:

Время		Значение геопотенциала	Зональная скорость ветра	Меридиональная скорость ветра
1	1	5389.0	9.0	16.0
5	1	5389.0	10.0	16.0
9	1	5389.0	10.0	16.0
13	1	5389.0	10.0	16.0
17	1	5389.0	11.0	16.0
21	1	5389.0	11.0	15.0
25	1	5389.0	11.0	15.0
29	1	5389.0	11.0	15.0
33	1	5389.0	12.0	15.0
37	1	5389.0	12.0	15.0
41	1	5389.0	12.0	14.0
45	1	5389.0	12.0	14.0
49	1	5389.0	13.0	14.0

Согласно данным, на языке Fortran была написана программа для моделирования переноса пассивных трассеров, в которой была использована регулярная сферическая сетка, охватывающая весь земной шар, со следующими характеристиками:

NX	360	Количество точек по долготе (λ)
NY	181	Количество точек по широте (φ)
dx, dy	1°	Угловое разрешение
dt	60 сек	Временной шаг
NT	900	Количество временных шагов

Данная сетка характеризуется глобальным покрытием, с полным кругом долготы (0° до 360°) и широты (-90° до $+90^\circ$). Высота рассматриваемого переноса – 500 гПа.

Были заданы экваториальный и полярный радиусы Земли – 6378200 м и 6356860 м соответственно.

Заданы следующие граничные условия:

- 1) По долготе (восток-запад)
- 2) По широте (север-юг). Из-за ошибки на полюсах проведена замена значений на широтах 85° – 90° средним значением по широте 84° .

В программе были подобраны различные положительные диффузионные коэффициенты ν и коэффициенты антидиффузии μ для сравнения визуализации результатов.

Из файла с начальными данными `dannye.txt` были прочитаны следующие начальные поля:

- 1) Геопотенциал
- 2) Зональная скорость ветра
- 3) Меридиональная скорость ветра

Программа реализует классическую схему расщепления с модификациями для устойчивости на сферической сетке.

Источник загрязнения определён на координате 60° с.ш. 30° в.д.

Был рассчитан параметр Кориолиса:

$$L(\varphi_j) = 2 \cdot (7.29 \times 10^{-5}) \cdot \sin(\varphi_j)$$

Уравнение переноса пассивного трассера в двумерной сферической системе координат:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{u}{a \cdot \cos \varphi} \frac{\partial q}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial q}{\partial \varphi} = D \left(\frac{1}{a^2 \cos^2 \varphi} \frac{\partial^2 q}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 q}{\partial \varphi^2} \right)$$

Число Куранта:

$$C_x = \frac{u}{2 \cdot a \cdot \cos \varphi}$$

Для вычисления концентрации использован метод коррекции потоков Борнса-Бука:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) = 0$$

$$\rho_j^* = \rho_j^n - 0.5C (\rho_{j+1}^n - \rho_{j-1}^n) + (v + 0.5C^2) (\rho_{j+1}^n - 2\rho_j^n + \rho_{j-1}^n)$$

$$\rho_j^{n+1} = \rho_j^* - \mu (\rho_{j+1}^* - 2\rho_j^* + \rho_{j-1}^*)$$

Данный метод в программе выражен следующим образом:

$$qzv(i,j) = q(s,i,j) - 0.5 * C * (q(s,ip,j) - q(s,im,j)) + (vv + 0.5 * C^2) * (q(s,ip,j) - 2 * q(s,i,j) + q(s,im,j)) + FF(i,j)$$

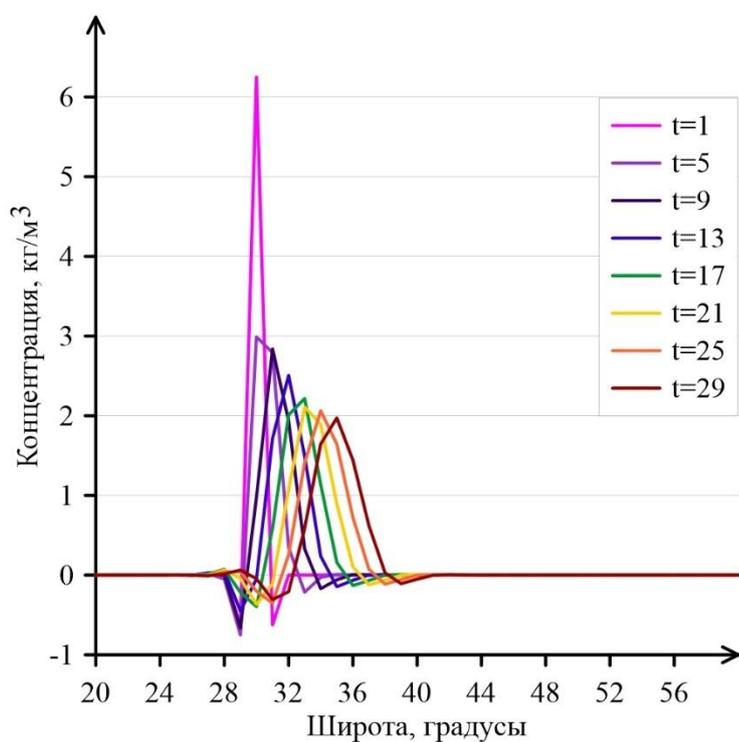
$$qq(i,j) = qzv(i,j) - n * (qzv(ip,j) - 2 * qzv(i,j) + qzv(im,j))$$

$$qzv(i,j) = qq(i,j) - 0.5 * C * (qq(i,j+1) - qq(i,j-1)) + (vv + 0.5 * C^2) * (qq(i,j+1) - 2 * qq(i,j) + qq(i,j-1))$$

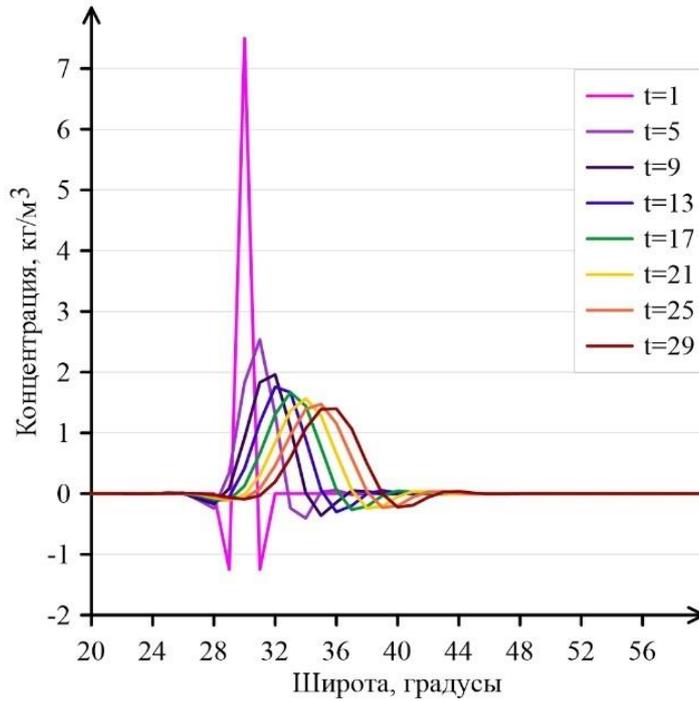
$$q(s+1,i,j) = qzv(i,j) - n * (qzv(i,j+1) - 2 * qzv(i,j) + qzv(i,j-1))$$

Здесь положительный диффузионный коэффициент представлен как ν , а коэффициент антидиффузии – как μ . Подставим различные значения коэффициентов и визуализируем изменение распространения концентрации примеси из точки истока в программе GrADS (Grid Analysis and Display System). Далее построим графики изменения концентрации со временем для каждого случая (используя 8 моментов времени).

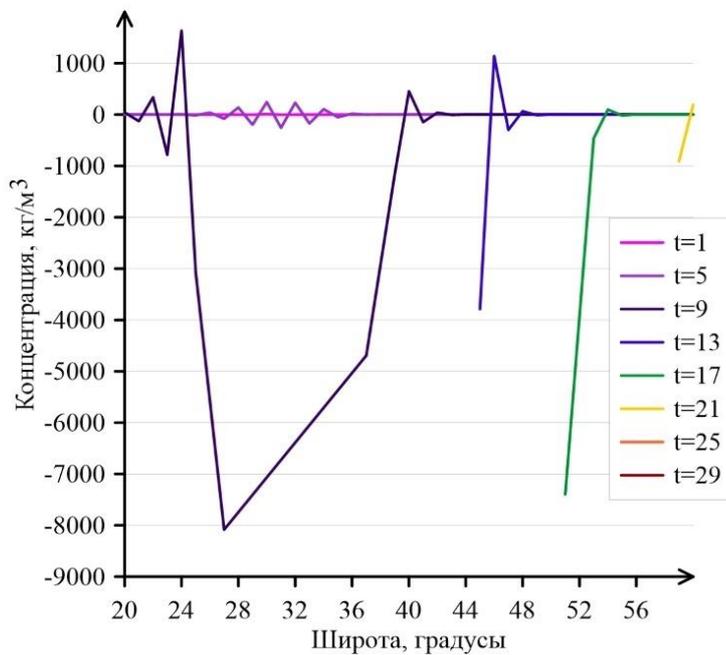
Случай 1. Коэффициенты ν и μ одинаковы и равны 0.125:



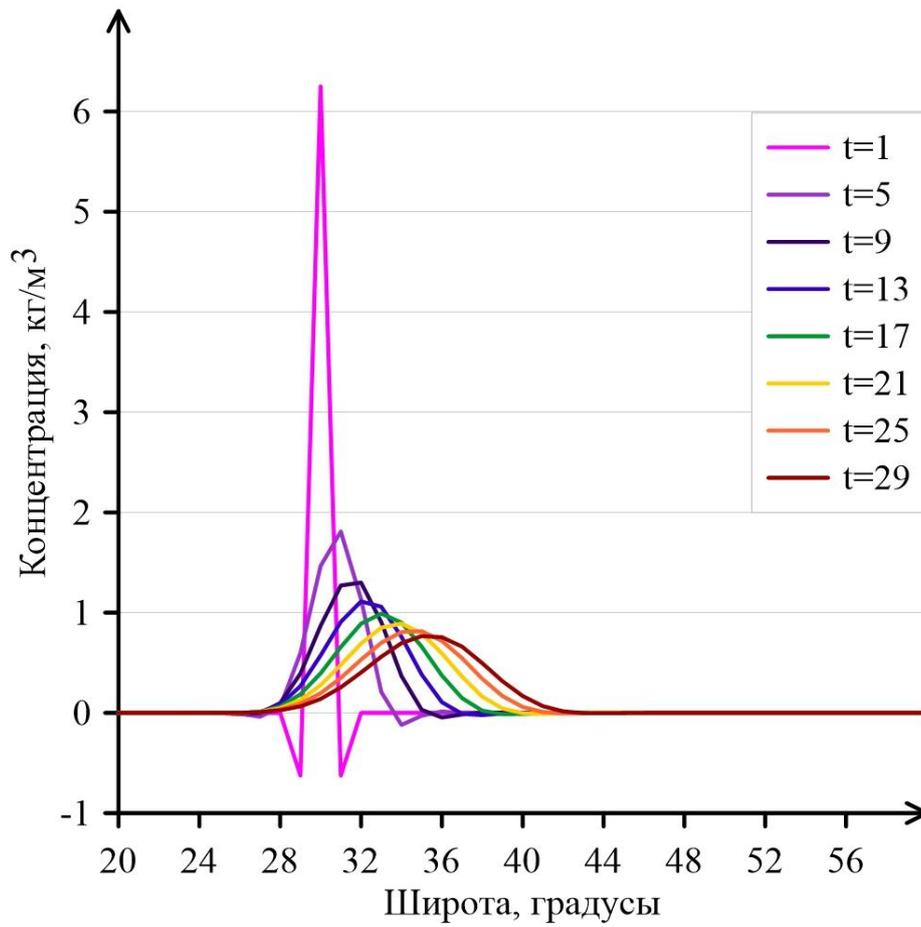
Случай 2. Коэффициенты ν и μ одинаковы и равны 0.25:



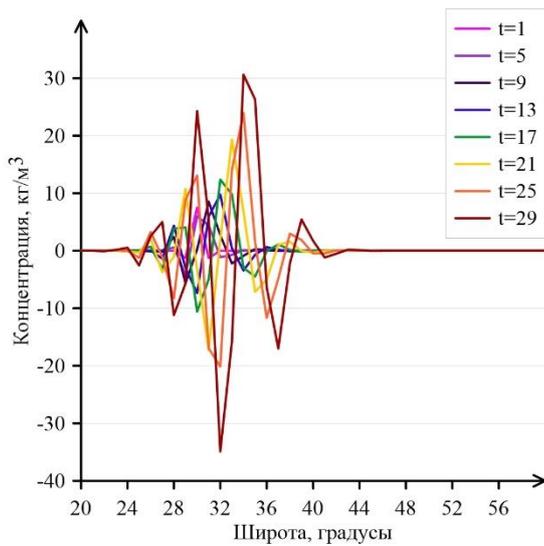
Случай 3. Коэффициенты ν и μ одинаковы и равны 0.5 – множество осцилляций:



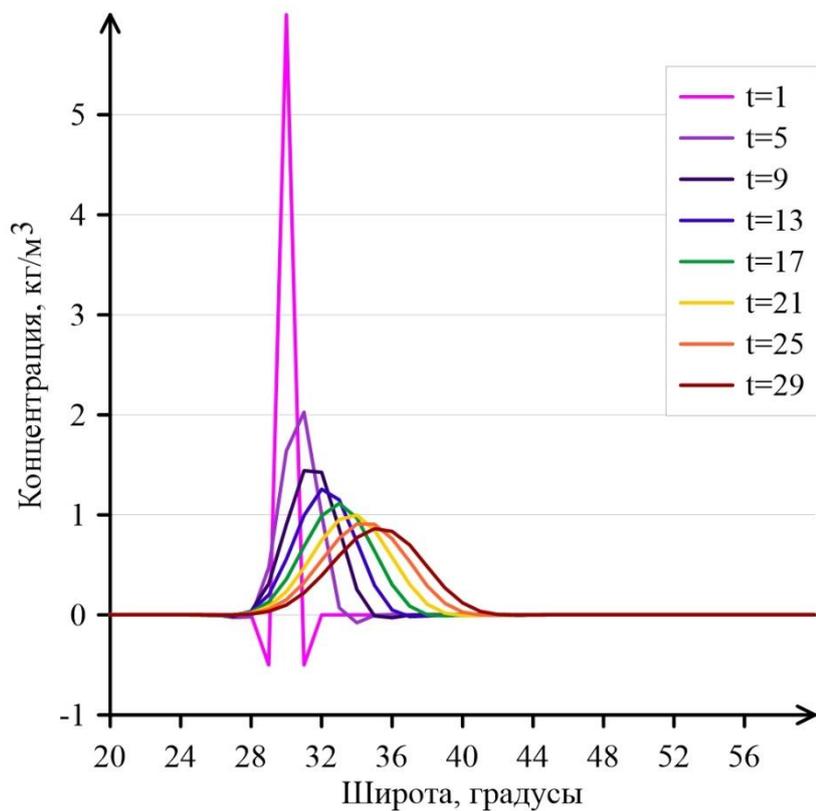
Случай 4. Коэффициент $\nu = 0.25$, коэффициент $\mu = 0.125$:



Случай 5. Коэффициент $\nu = 0.125$, коэффициент $\mu = 0.25$ – множество осцилляций.



Случай 6. Коэффициент $\nu = 0.2$, коэффициент $\mu = 0.1$:



Заключение

В результате проделанной работы были получены следующие результаты.

Из полученных графиков видно, что модель с наименьшими вычислительными ошибками достигается в случае б, когда положительному диффузионному коэффициенту придаётся значение 0.2, а коэффициенту антидиффузии – значение 0.1. В этом случае коэффициент диффузии обеспечивает достаточное подавление численных шумов, в то время как второй предотвращает перекомпенсацию, сохраняя четкость фронта. В результате графики показывают устойчивое распространение примеси без осцилляций и избыточного размывания. Полученные данные соответствуют реальным процессам, где диффузия (естественное рассеивание) обычно превосходит антидиффузию (локальное усиление градиентов).

Относительное отсутствие ложных осцилляций – значений концентрации ниже 0, – подтверждает монотонность решения, что критично для задач переноса.

Таким образом, значения $\nu = 0.2$ и $\mu = 0.1$ минимизируют ошибки дискретизации, обеспечивая качественное воспроизведение процессов в атмосфере.

Этот результат согласуется с теорией метода коррекции потоков, где важно соблюдать соотношение $\nu \approx 2\mu$ для баланса между сглаживанием и разрешающей способностью.

Список используемых источников

- 1) Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы - Л.: Гидрометиздат. - 1984. - 752 с
- 2) Будыко М.И., Голицын Г.С., Израэль Ю.А. Глобальные климатические катастрофы. – М.: Гидрометеиздат, 1986. –160 с.
- 3) Climate Change. Impacts adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to 8 Magyar Tudományos Journal # 47, 2020 Assesment Report Four of the Intergovernmental Panes of Climate Change (IPCC), Cambridge, Cambridge University Press, 2007, 973 p.
- 4) Алюян А.Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере / Курс лекций. – М.: ИВМ РАН, 2002 – 201 с.
- 5) Алюян А.Е. Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере, М.: Наука, 2008, 415 с.
- 6) Седунов Ю.С. Атмосфера. Справочник – Л.: Гидрометеиздат. - 1991. – 504 с.
- 7) Суздалева А.Л., Горюнова С.В. Биотехносфера: экология и безопасность жизнедеятельности. Монография. – М.: МГПУ, 2017. – 256 с.
- 8) Белов П.Н., Численные методы прогноза погоды : [Учеб. для вузов по спец. "Метеорология"] / П. Н. Белов, Е. П. Борисенков, Б. Д. Панин. - Ленинград : Гидрометеиздат, 1989. - 375,[1] с.
- 9) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. "Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate" [электронный источник]
- 10) Суздалева А. Л., Горюнова С. В. ГЛОБАЛЬНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЕГО ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ // Magyar Tudományos Journal. 2020. №47. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/globalnoe->

zagryaznenie-atmosfery-i-vozmozhnye-puti-ego-predotvrascheniya [электронный источник]

Приложения

Приложение А – Текст программы на языке Fortran для моделирования пассивных трассеров в Атмосфере.

Приложение Б – Изменение распределения концентрации примеси со временем ($t = 1 \dots 29$) из точечного источника. Коэффициенты ν и μ одинаковы и равны 0.125.

Приложение В – Изменение распределения концентрации примеси со временем ($t = 1, 2, 3, 27, 28, 29$) из точечного источника. Коэффициенты ν и μ одинаковы и равны 0.25.

Приложение Г – Изменение распределения концентрации примеси со временем ($t = 1, 2, 3, 27, 28, 29$) из точечного источника. Коэффициенты ν и μ одинаковы и равны 0.5.

Приложение Д – Изменение распределения концентрации примеси со временем ($t = 1, 2, 3, 27, 28, 29$) из точечного источника. Коэффициент $\nu = 0.25$, коэффициент $\mu = 0.125$.

Приложение Е – Изменение распределения концентрации примеси со временем ($t = 1, 2, 3, 27, 28, 29$) из точечного источника. Коэффициент $\nu = 0.125$, коэффициент $\mu = 0.25$.

Приложение Ж – Изменение распределения концентрации примеси со временем ($t = 1, 2, 3, 27, 28, 29$) из точечного источника. Коэффициент $\nu = 0.2$, коэффициент $\mu = 0.1$.

```

integer, parameter :: NX = 360, NY = 181, NY5=NY-5,NT =
900,NTT=NT-1, NY6 = NY-6, NY10=NY-10
real, dimension (NT,NX,NY) :: f, q, u, v
real,dimension (NX,NY) :: FF, qzv, qq
real,dimension (NY) :: L,a
real :: dx = 1., dy = 1., dt = 60, sink=0.7, n=0.1, vv=0.2, C, C2
integer s
pi=3.14 ; dfi=dx ; dx=dx*pi/180. ; dy=dy*pi/180.
FF=0

open(1,file='dannye.txt')
read(1,'(2i7,3f10.1)') ((i,j,F(1,i,j),U(1,i,j),V(1,i,j),i=1,NX),j=1,NY)
close(1)
fi=-90
do j = 1, NY
    L(j)=2*7.29E-5*sind(fi)
    a(j)=cosd(fi)*(6378200-6356860) + 6356860
    fi=fi+dfi
enddo
open(94,file='begin.dat') ; write(94,'(2i7,3f10.1)')
((i,j,f(1,i,j),u(1,i,j),v(1,i,j),i=1,NX),j=1,NY) ; close(94)
do s = 1, NTT ; write(*,*) 's=',s
    FF=0
    !if(s<10) FF(30,150)=5
    FF(30,150)=5
    u(s+1,:::)=u(s,:::); v(s+1,:::)=v(s,:::)
    do i = 1, NX

```

```

    ip=i+1
        im=i-1
        if(i==1) im=NX
        if(i==NX) ip=1
    fi=-86
do j = 5, NY5
        C=u(s+1,i,j)*dt/a(j)/cosd(fi)/dx/2      ; C2=C*C
        qzv(i,j)=q(s,i,j)-0.5*C*(q(s,ip,j)-
q(s,im,j))+(vv+0.5*C2)*(q(s,ip,j)-2*q(s,i,j)+q(s,im,j))+FF(i,j)
    end do
enddo
    qsr1=sum(qzv(:,NY6))/NX
qsr=sum(qzv(:,6))/NX
    do i=1,NX
        qzv(i,1:4)=qsr
        qzv(i,NY5:NY)=qsr1
    enddo
do i = 1, NX
    ip=i+1
        im=i-1
        if(i==1) im=NX
        if(i==NX) ip=1
    fi=-86
do j=5,NY5
        qq(i,j)=qzv(i,j)-n*(qzv(ip,j)-2*qzv(i,j)+qzv(im,j))
    end do
enddo
    Qsr1=sum(qq(:,NY6))/NX
    Qsr=sum(qq(:,6))/NX
    do i=1,NX

```

```

qq(i,1)=Qsr
qq(i,NY5)=Qsr1
enddo
do i = 1, NX
    ip=i+1
    im=i-1
    if(i==1) im=NX
    if(i==NX) ip=1
    fi=-86
    do j = 5, NY5
        C=v(s+1,i,j)*dt/a(j)/dx/2 ; C2=C*C
        qzv(i,j)=qq(i,j)-0.5*C*(qq(i,j+1)-qq(i,j-
1)))+(vv+0.5*C2)*(qq(i,j+1)-2*qq(i,j)+qq(i,j-1))
    end do
enddo
qsr1=sum(qzv(:,NY6))/NX
qsr=sum(qzv(:,6))/NX
do i=1,NX
    qzv(i,1:4)=qsr
    qzv(i,NY5:NY)=qsr1
enddo
do i = 1, NX
    ip=i+1
    im=i-1
    if(i==1) im=NX
    if(i==NX) ip=1
    fi=-86
    do j=5,NY5
        q(s+1,i,j)=qzv(i,j)-n*(qzv(i,j+1)-2*qzv(i,j)+qzv(i,j-1))
    end do

```

```

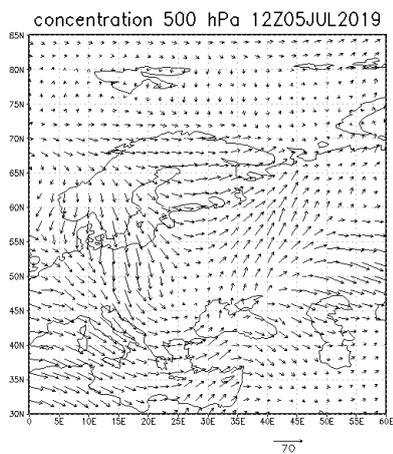
        enddo
        Qsr1=sum(q(s+1, :, NY6))/NX
        Qsr=sum(q(s+1, :, 6))/NX
        do i=1, NX
            q(s+1, i, 1)=Qsr
            q(s+1, i, NY5)=Qsr1
        enddo
    enddo
open(2, file='2result.dat')
do i=1, NX
    do j = 5, NY5
        write (2, '(2i7,3F15.3)') i, j, f(NTT+1, i, j), u(NTT+1, i, j), v(NTT+1, i, j)
    enddo
enddo
close (2)

open(2, file='2QQQ111.dat')
    write (2, '(2i9,30F10.3)') ((i, j, (q(s, i, j), s=1, 30), j=120, 180), i=20, 60)
close (2)
open(3, file='2shir150.dat') ; write (3, '(i9,30F10.3)')
(i, (q(s, i, 150), s=1, 30), i=20, 60) ; close(3)
open(23, file='2ff_grads.dat', access='direct', form='unformatted', recl=NX*N
Y10*4*3)
open(24, file='2qq_grads111.dat', access='direct', form='unformatted', recl=N
X*NY10*4)
open(25, file='2all_grads111.dat', access='direct', form='unformatted', recl=N
X*NY10*4*4)
do s=1, NTT+1
    write(23, rec=s) f(s, :, 6:ny5), u(s, :, 6:NY5), v(s, :, 6:Ny5)
    write(24, rec=s) q(s, :, 6:Ny5)

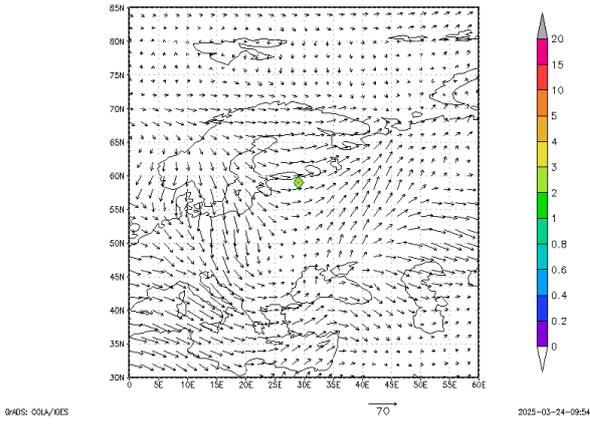
```

```
write(25,rec=s) f(s,:,6:ny5),u(s,:,6:NY5),v(s,:,6:Ny5),q(s,:,6:NY5)
enddo
close(23)
close(24)
close(25)
stop
end
```

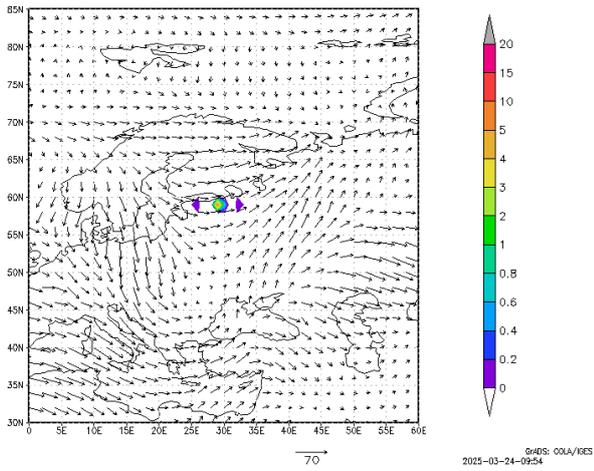
Приложение Б



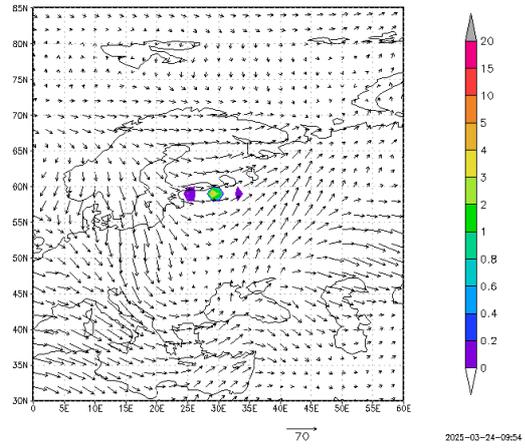
concentration 500 hPa 12:01Z05JUL2019



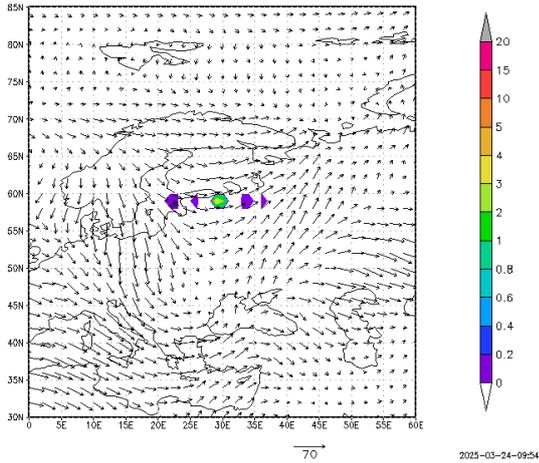
concentration 500 hPa 12:02Z05JUL2019



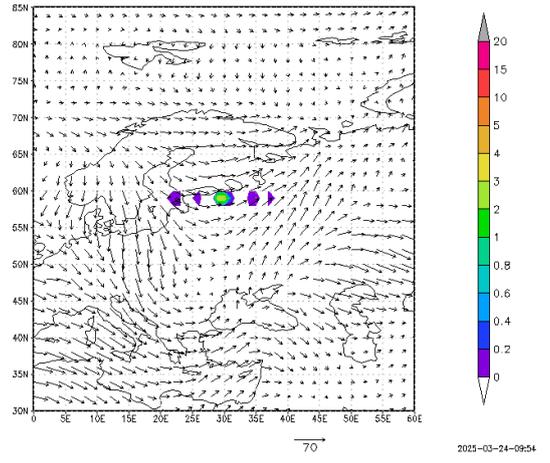
concentration 500 hPa 12:03Z05JUL2019



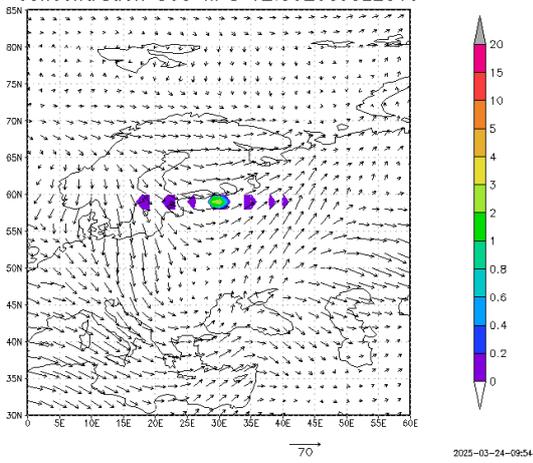
concentration 500 hPa 12:04Z05JUL2019



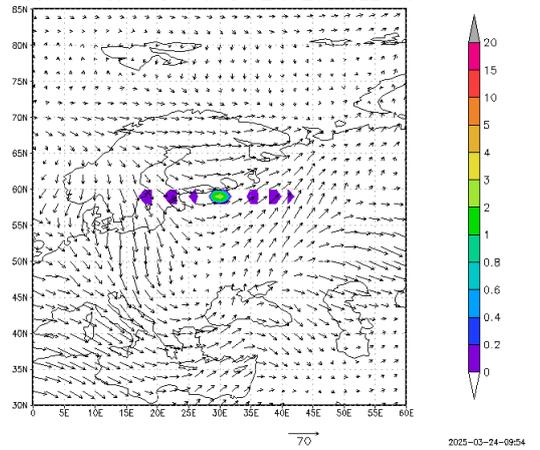
concentration 500 hPa 12:05Z05JUL2019



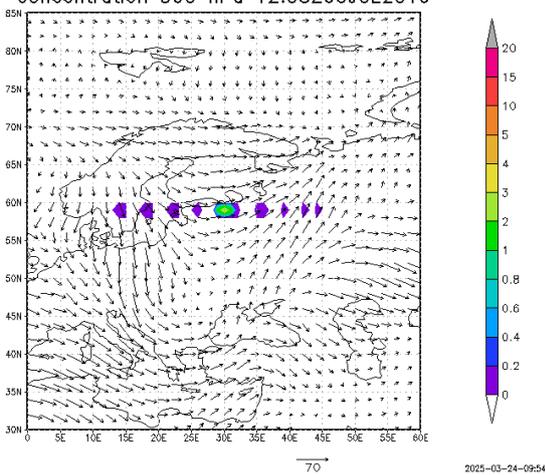
concentration 500 hPa 12:06Z05JUL2019



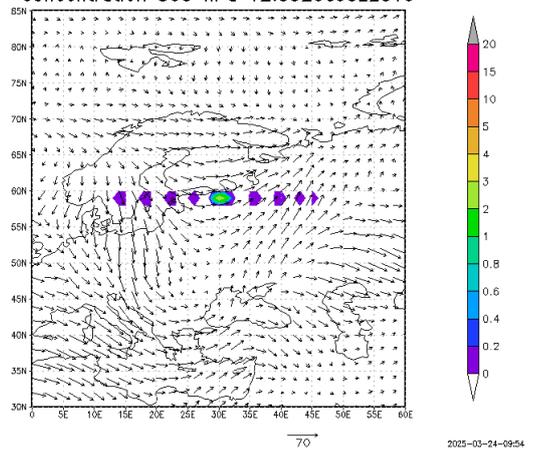
concentration 500 hPa 12:07Z05JUL2019



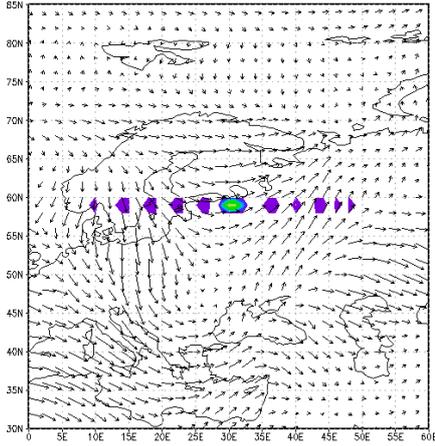
concentration 500 hPa 12:08Z05JUL2019



concentration 500 hPa 12:09Z05JUL2019



concentration 500 hPa 12:10Z05JUL2019

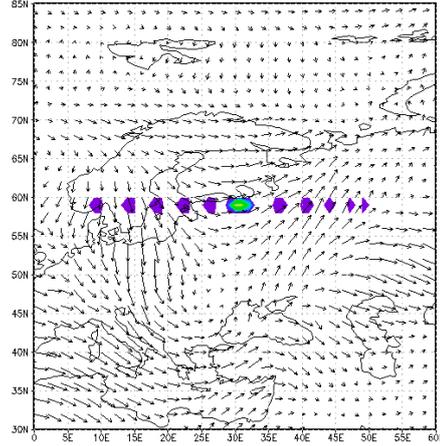


GADS: COLA/IBES

70°

2025-03-24-09:54

concentration 500 hPa 12:11Z05JUL2019

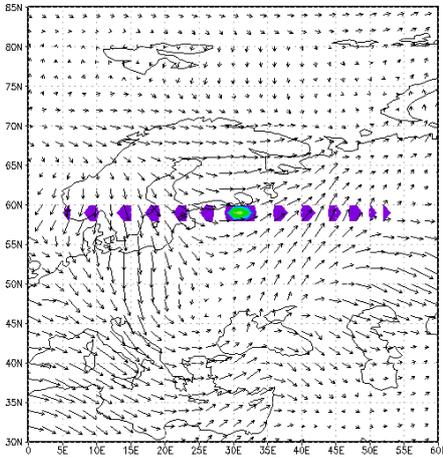


GADS: COLA/IBES

70°

2025-03-24-09:54

concentration 500 hPa 12:12Z05JUL2019

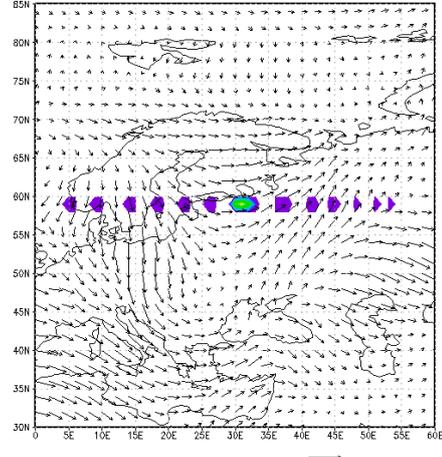


GADS: COLA/IBES

70°

2025-03-24-09:54

concentration 500 hPa 12:13Z05JUL2019

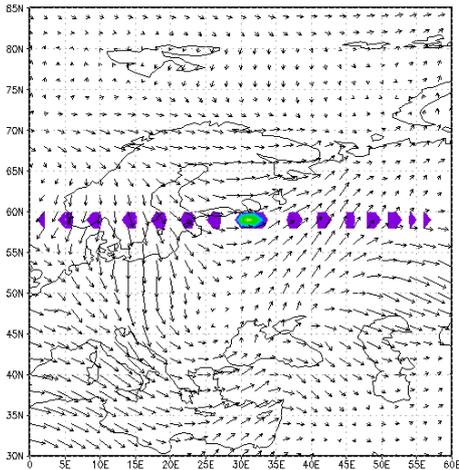


GADS: COLA/IBES

70°

2025-03-24-09:54

concentration 500 hPa 12:14Z05JUL2019

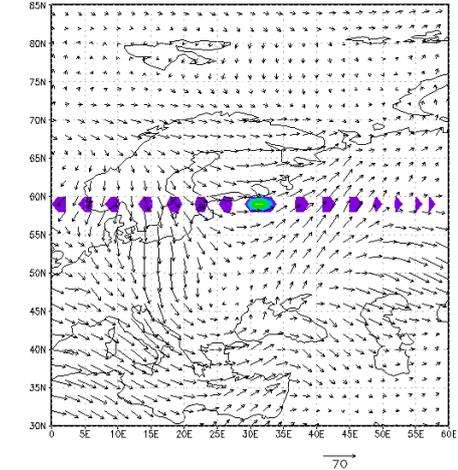


GADS: COLA/IBES

70°

2025-03-24-09:54

concentration 500 hPa 12:15Z05JUL2019

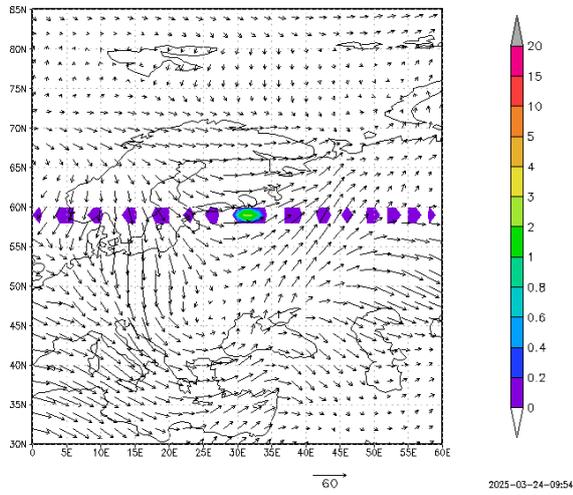


GADS: COLA/IBES

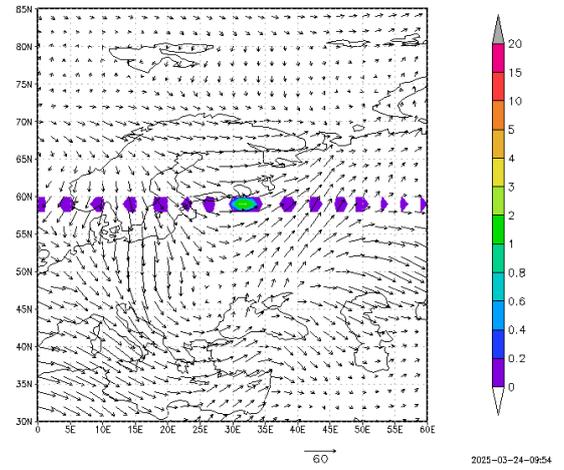
70°

2025-03-24-09:54

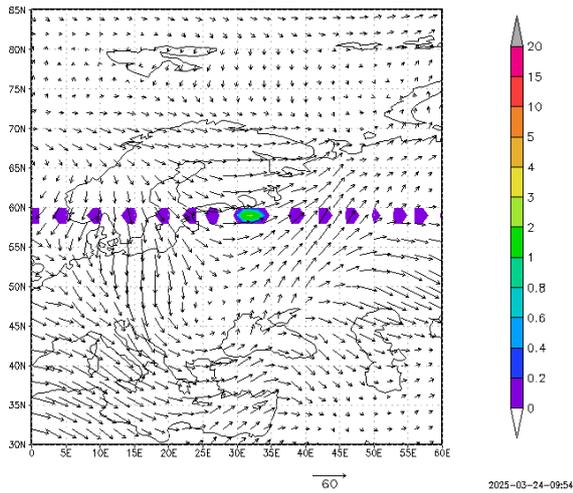
concentration 500 hPa 12:16Z05JUL2019



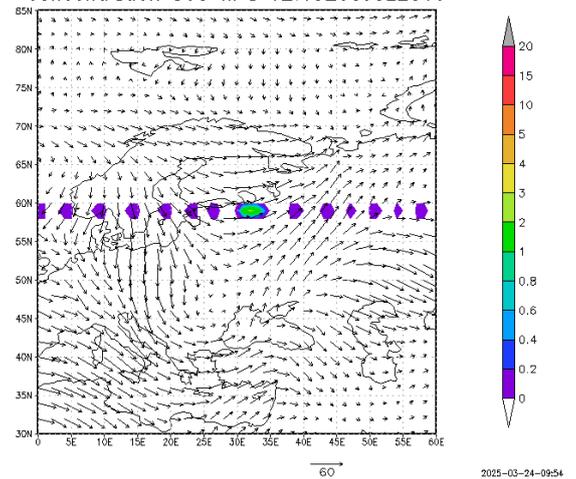
concentration 500 hPa 12:17Z05JUL2019



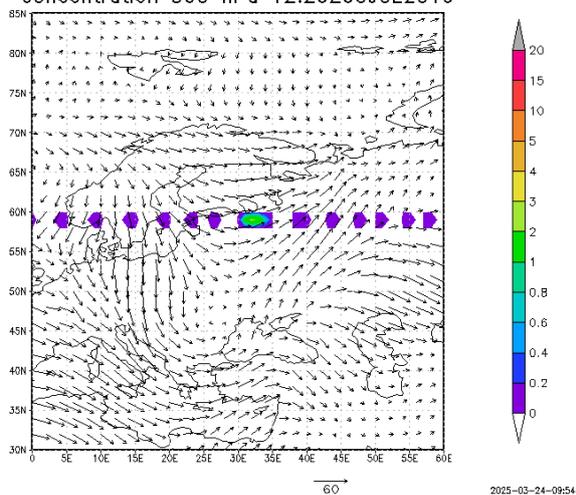
concentration 500 hPa 12:18Z05JUL2019



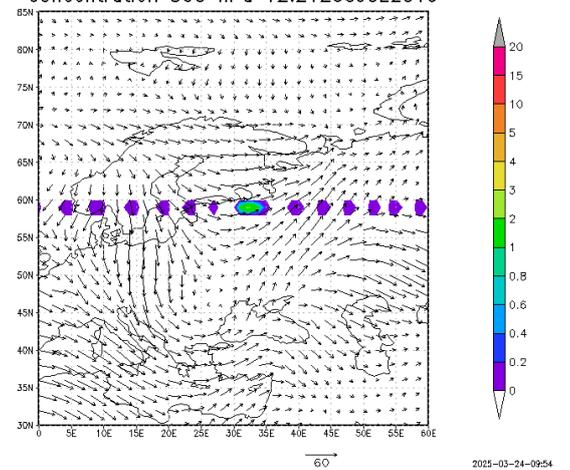
concentration 500 hPa 12:19Z05JUL2019



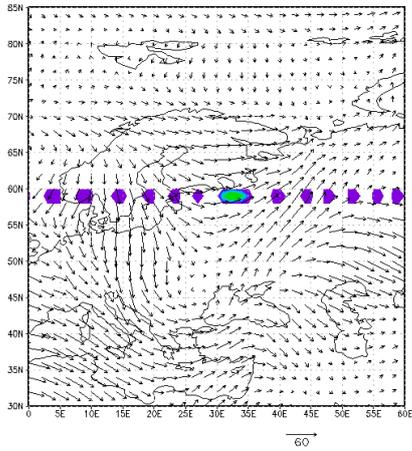
concentration 500 hPa 12:20Z05JUL2019



concentration 500 hPa 12:21Z05JUL2019



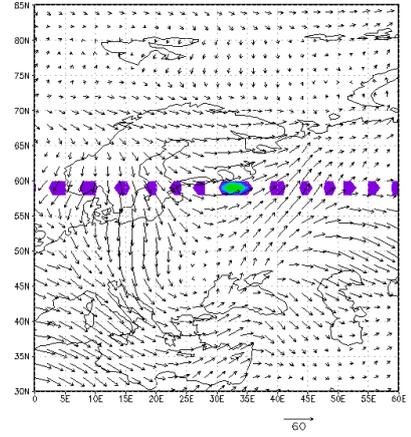
concentration 500 hPa 12:22Z05JUL2019



g4ds: COLA/IGES

2025-03-24-09:54

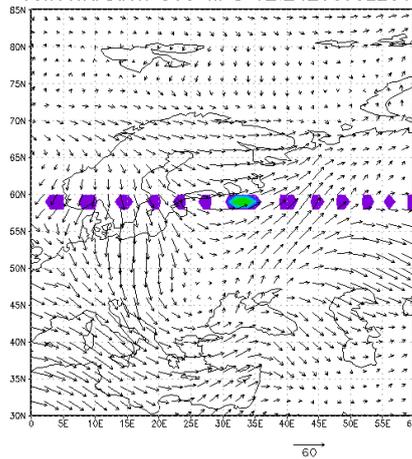
concentration 500 hPa 12:23Z05JUL2019



g4ds: COLA/IGES

2025-03-24-09:54

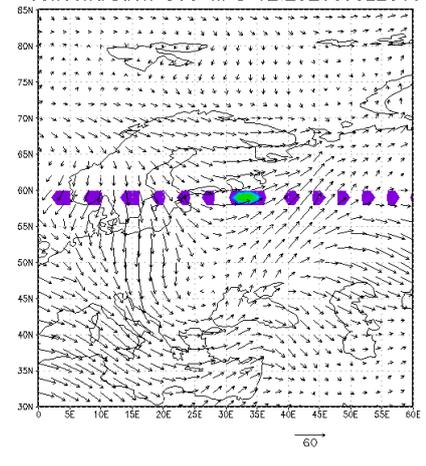
concentration 500 hPa 12:24Z05JUL2019



g4ds: COLA/IGES

2025-03-24-09:54

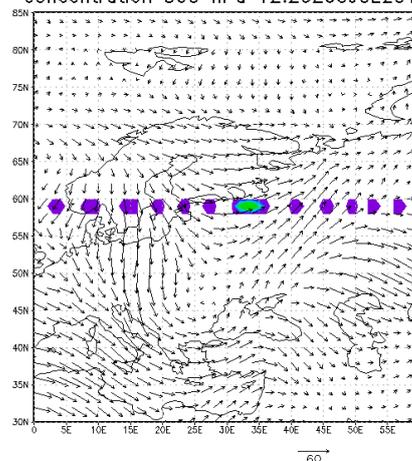
concentration 500 hPa 12:25Z05JUL2019



g4ds: COLA/IGES

2025-03-24-09:54

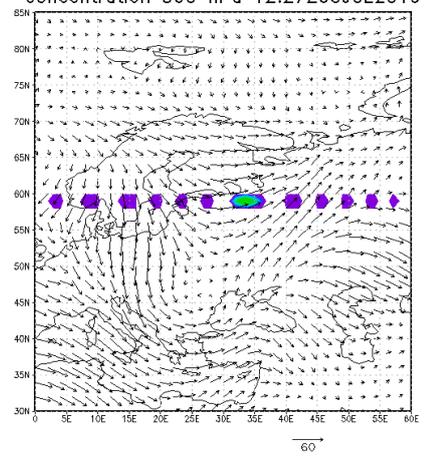
concentration 500 hPa 12:26Z05JUL2019



g4ds: COLA/IGES

2025-03-24-09:54

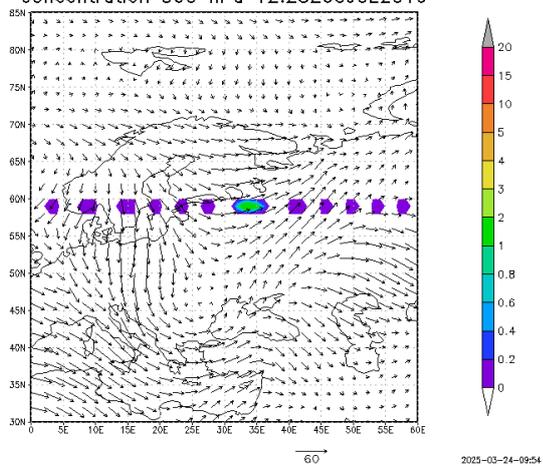
concentration 500 hPa 12:27Z05JUL2019



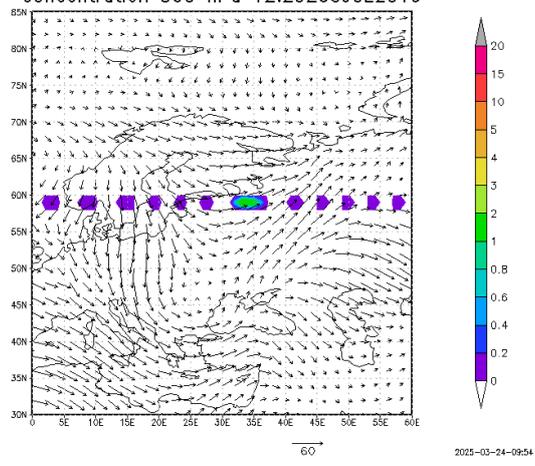
g4ds: COLA/IGES

2025-03-24-09:54

concentration 500 hPa 12:28Z05JUL2019

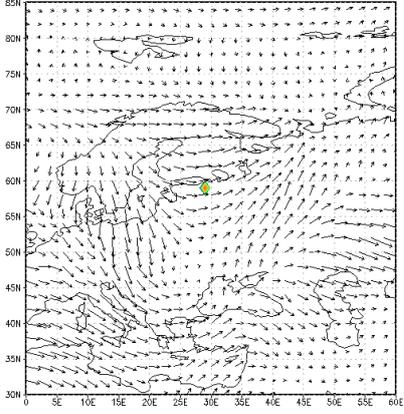


concentration 500 hPa 12:29Z05JUL2019



Приложение В

concentration 500 hPa 12:01Z05JUL2019



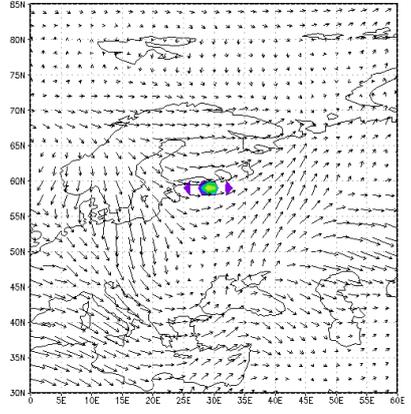
94DS: COLA/RES

70

2025-03-24-09:58

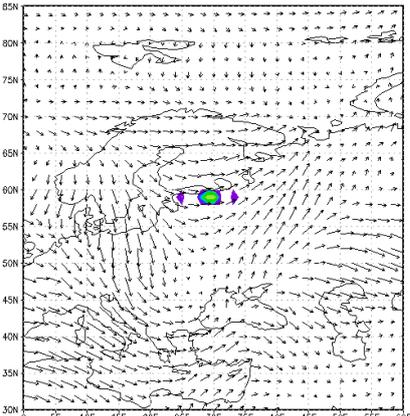
94DS: COLA/RES

concentration 500 hPa 12:02Z05JUL2019



2025-03-24-09:58

concentration 500 hPa 12:03Z05JUL2019



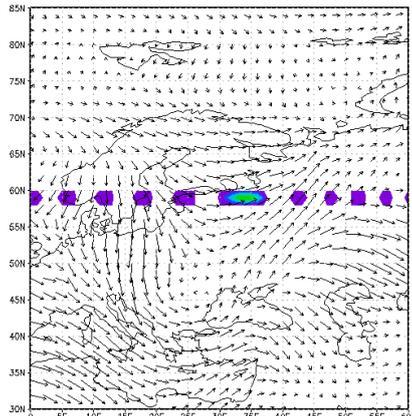
94DS: COLA/RES

70

2025-03-24-09:58

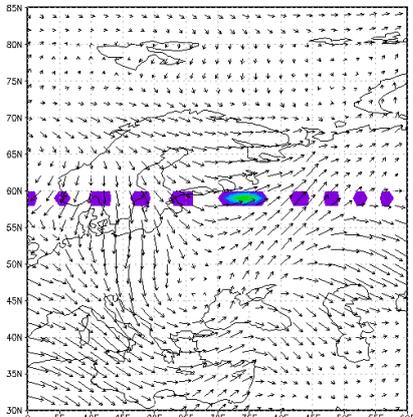
94DS: COLA/RES

concentration 500 hPa 12:27Z05JUL2019



2025-03-24-09:58

concentration 500 hPa 12:28Z05JUL2019



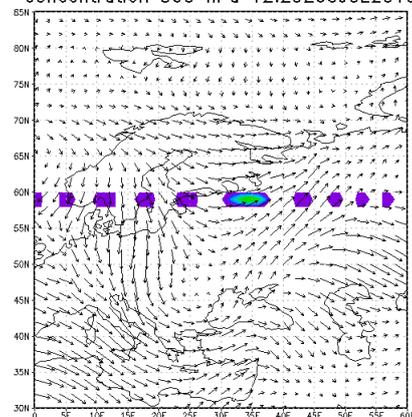
94DS: COLA/RES

60

2025-03-24-09:58

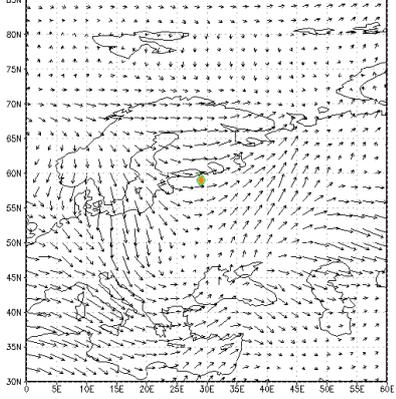
94DS: COLA/RES

concentration 500 hPa 12:29Z05JUL2019



2025-03-24-09:58

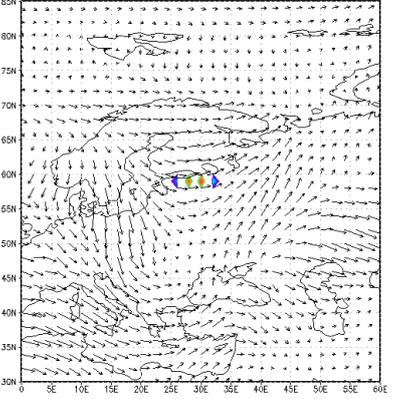
concentration 500 hPa 12:01Z05JUL2019



g4ds: COLA/RES

2025-03-24-10:02

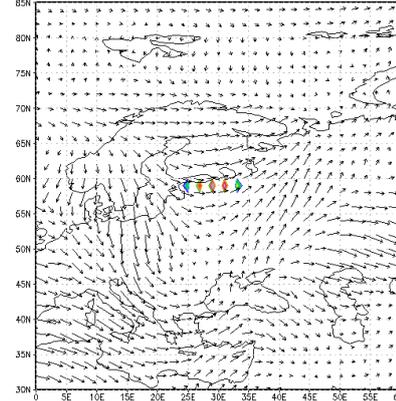
concentration 500 hPa 12:02Z05JUL2019



g4ds: COLA/RES

2025-03-24-10:02

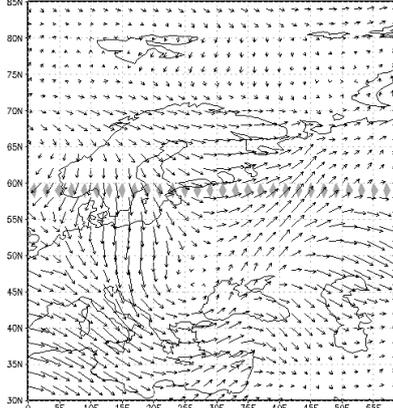
concentration 500 hPa 12:03Z05JUL2019



g4ds: COLA/RES

2025-03-24-10:02

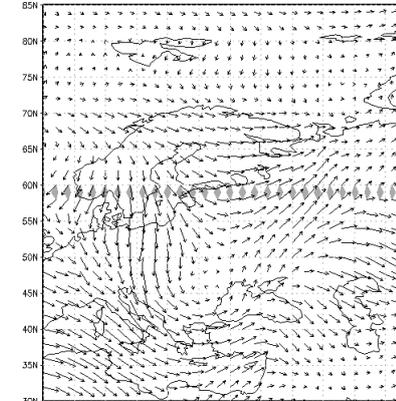
concentration 500 hPa 12:27Z05JUL2019



g4ds: COLA/RES

2025-03-24-10:02

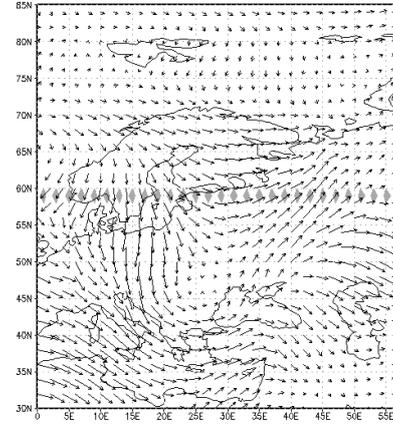
concentration 500 hPa 12:28Z05JUL2019



g4ds: COLA/RES

2025-03-24-10:02

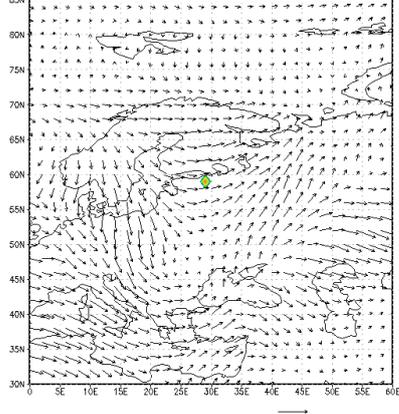
concentration 500 hPa 12:29Z05JUL2019



g4ds: COLA/RES

2025-03-24-10:02

concentration 500 hPa 12:01Z05JUL2019

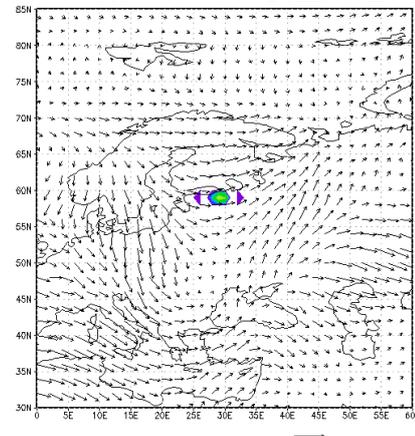


GRADS: COLA/IGES

70°

2025-03-24-10:05

concentration 500 hPa 12:02Z05JUL2019

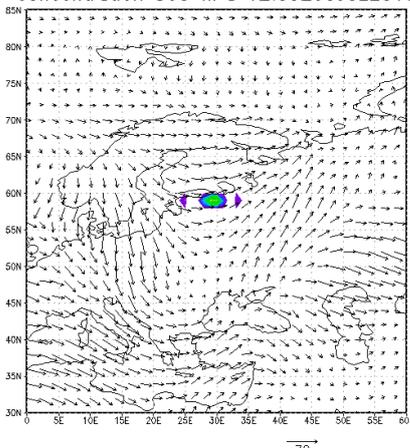


GRADS: COLA/IGES

70°

2025-03-24-10:05

concentration 500 hPa 12:03Z05JUL2019

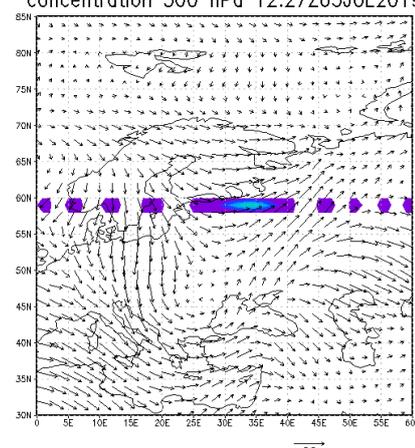


GRADS: COLA/IGES

70°

2025-03-24-10:05

concentration 500 hPa 12:27Z05JUL2019

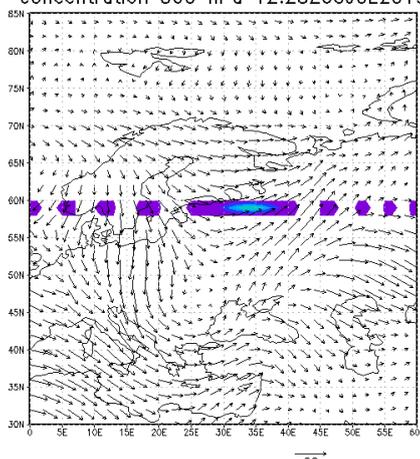


GRADS: COLA/IGES

60°

2025-03-24-10:05

concentration 500 hPa 12:28Z05JUL2019

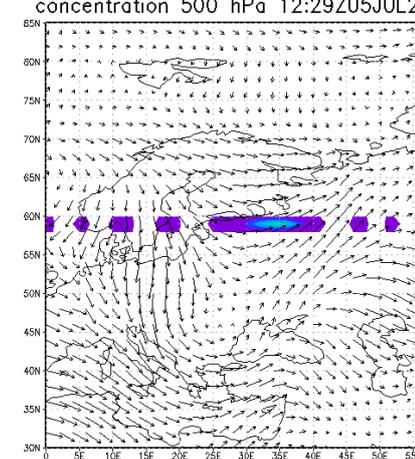


GRADS: COLA/IGES

60°

2025-03-24-10:05

concentration 500 hPa 12:29Z05JUL2019



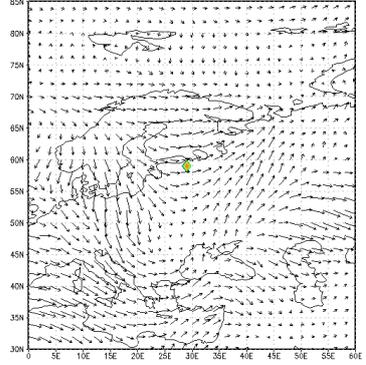
GRADS: COLA/IGES

60°

2025-03-24-10:05

Приложение E

concentration 500 hPa 12:01Z05JUL2019



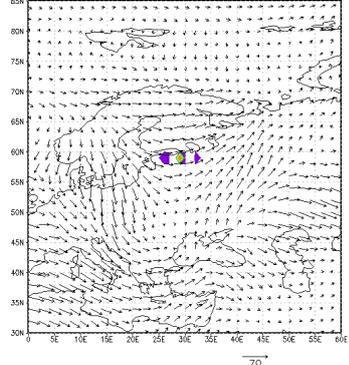
CMRES: OOLA/RES

70°

2025-03-24-10:08

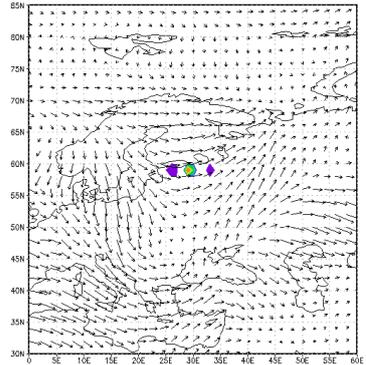
CMRES: OOLA/RES

concentration 500 hPa 12:02Z05JUL2019



2025-03-24-10:08

concentration 500 hPa 12:03Z05JUL2019



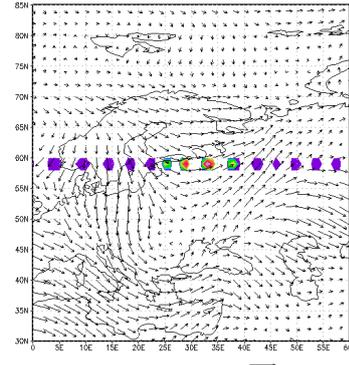
CMRES: OOLA/RES

70°

2025-03-24-10:08

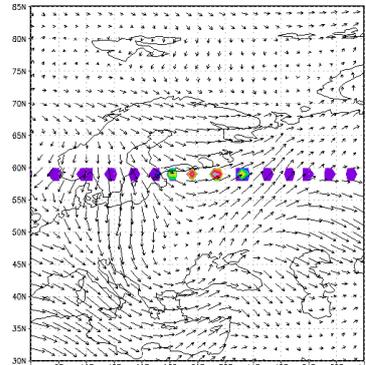
CMRES: OOLA/RES

concentration 500 hPa 12:27Z05JUL2019



2025-03-24-10:08

concentration 500 hPa 12:28Z05JUL2019



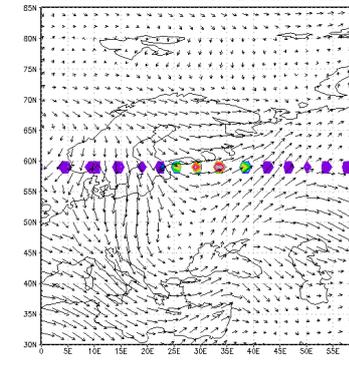
CMRES: OOLA/RES

60°

2025-03-24-10:08

CMRES: OOLA/RES

concentration 500 hPa 12:29Z05JUL2019



2025-03-24-10:08

