А. Айдосов, Г.А. Айдосов, Н.С. Заурбеков

МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ КОМПАНЕНТОВ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Монография

Рекомендовано УМО РАЕ
по классическому университетскому
и техническому образованию в качестве учебного
пособия для студентов высших учебных заведе-
ний, обучающихся по направлениям подготовки
(специальностям):
230100.62 – «Информатика и вычислительная
техника»;
230400.62 – «Информационные системы
и технологии»;
231000.62 – «Программная инженерия»;
230105 – «Программное обеспечение вычисли-
тельной техники и автоматизированных систем»;
230201 – «Информационные системы и технологии»;
5В 060800 – «Экология»

Москва
2018

УДК 502/504(035:3):543.068:681.3
ББК 20.18
А37

Рецензенты:

Рысбайулы Б. – доктор физико-математических наук, профессор;
Шакенов К.К. – доктор физико-математических наук, профессор.

Рекомендовано к изданию Алматинским технологическим университетом.

Айдосов А., Айдосов Г.А., Заурбеков Н.С.

А37 Модельная оценка экологической обстановки компонентов природной среды с учетом атмосферных процессов: монография / А. Айдосов, Г.А. Айдосов, Н.С. Заурбеков. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2018. – 342 с.

ISBN 978-5-91327-508-0

DOI 10.17513/np.293

В монографии изложены возможности модельной оценки влияния нефтегазовых производств Западного Казахстана на окружающую среду при различных атмосферных условиях и авариях на нефтегазодобывающих или перерабатывающих производствах.

Рассмотрены следующие задачи: Разработана модель региональных атмосферных процессов, основанная на квазистатическом приближении, с привлечением уравнений для энергии турбулентности и турбулентной диссипации; Построена бароклинная квазистатическая модель прогноза штормовых катабатических ветров; Предложена новая гидродинамическая модель водотока и переноса примесей для произвольного рельефа дна; Разработаны новые негидростатические модели мезомасштабных процессов в атмосфере и стратифицированных водоемах с учетом сжимаемости для изучения мезо и микроклиматических закономерностей загрязнения окружающей среды; Создана трехмерная нестационарная модель переноса примесей, полученной численной проекционно-сеточными методами; Предложены численные методы решения систем дифференциальных уравнений, основанные на законах сохранения и удовлетворяющие необходимым требованиям аппроксимации, устойчивости и экономичности.

Работа предназначена для научных работников, профессорско-преподавательского коллектива ВУЗа, студентов, магистров и докторантов естественных и инженерно-технических специальностей, занимающихся проблемами прикладной экологии и математическому моделированию.

Библиография 134, таблица 43, иллюстрация 60, приложение А. Библиография 46, таблица 23, иллюстрация 13, приложение Б.

УДК 502/504(035:3):543.068:681.3
ББК 20.18

ISBN 978-5-91327-508-0

© А. Айдосов, Г.А. Айдосов,
Н.С. Заурбеков, 2018
© ИД «Академия Естествознания»
© АНО «Академия Естествознания»

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 6

1. ИНФОРМАЦИОННОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАССОЭНЕРГООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В АТМОСФЕРЕ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ГЕОСИСТЕМЫ 15
   - 1.1. Физико-географическое описание и климатические особенности природно-технической геосистемы промышленных регионов Республики Казахстан на примерах Карачаганакского нефте газоконденсатного месторождения и Павлодарской области 16
     - 1.1.1. Физико-географическое описание и климатические особенности природно-технической геосистемы 16
     - 1.1.2. Орографическое описание промышленных регионов 28
   - 1.2. Статистические показатели по источникам загрязнения атмосферы технополиса и их анализ 28
     - 1.2.1. Параметры и характеристики источников выбросов вредных примесей Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения (КНГКМ) 28
     - 1.2.2. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников 31
     - 1.2.3. Загрязнение атмосферы передвижными источниками 36
   - 1.3. Статистические показатели загрязнения атмосферы по классам вредных веществ и их анализ 38
     - 1.3.1. Годовые и месячные показатели загрязнения 38
     - 1.3.2. Сезонные колебания загрязнения 42
     - 1.3.3. Современное состояние экологической обстановки природной среды Павлодарской области 43
       - 1.3.3.1. Общее состояние атмосферного воздуха Павлодарской области 43
       - 1.3.3.2. Современное состояние атмосферного воздуха городов Павлодара, Екибастуза и Аксу 44
   - 1.4. Статистические показатели влияния атмосферного загрязнения на здоровье населения региона и их анализ 49
     - 1.4.1. Модели экологической оценки влияния атмосферного загрязнения от стационарных источников на состояние здоровья населения городов Павлодар, Екибастуз и Аксу 50
     - 1.4.2. Показатели состояния здоровья городского населения Павлодарской области и их обусловленность влиянием атмосферного загрязнения 55

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ 61
   - 2.1. Основные уравнения динамики реальной атмосферы 62
     - 2.1.1. Уравнения движения реальной атмосферы в поле массовых сил 62
     - 2.1.2. Учет неровностей земной поверхности 65
     - 2.1.3. Уравнения баланса влаги в атмосфере 66
     - 2.1.4. Уравнения притока тепла 69
     - 2.1.5. Учет в уравнениях движения неоднородности атмосферных сред 72
   - 2.2. Исследование бароклинных процессов в сжимаемой атмосфере 73
     - 2.2.1. Уравнение для полной производной от давления и температуры в насыщенной атмосфере 74
     - 2.2.2. Прогностические уравнения для сглаженных значений метеорологических элементов в сжимаемой атмосфере 76

2.2.3. Вывод уравнений для изменения давления применительно к сглаженным величинам во влажной атмосфере ... 79
2.2.4. Уравнение для неадвективных изменений давления при отсутствии конденсации. Оценка роли турбулентной диффузии ... 80
2.2.5. Численная модель неадвективных изменений давления ... 81
2.3. Динамика вертикальных движений в облачной атмосфере ... 83
2.3.1. Вывод уравнения для вертикальной скорости в насыщенной атмосфере ... 84
2.3.2. Определение вертикальных скоростей во влажной ненасыщенной атмосфере ... 85
2.3.3. Расчет вертикальных движений в многослойной облачной атмосфере ... 86
2.3.4. Примеры расчета вертикальных движений вблизи облаков ... 88
2.3.5. Параметризация конвективных процессов в численных прогнозах ... 90
2.3.6. Учет фронтальных поверхностей при расчете вертикальных движений ... 94
2.4. Численная модель бароклинных процессов атмосферы и краткосрочного прогноза ... 96
2.4.1. Основные уравнения атмосферной циркуляции ... 96
2.4.2. Конечно-разностная схема решения задачи ... 98
2.4.3. Учет приземного трения и орографии ... 100
2.4.4. Полуявная схема реализации прогностической модели ... 101
2.4.5. Организация оперативных расчетов. Результаты испытания ... 106
2.4.6. Учет турбулентного обмена между океаном и атмосферой ... 112
2.4.7. Вычислительная экспериментальная проверка алгоритмов, описывающих динамический эффект орографии и трения ... 114
2.4.8. Расчет радиационного притока тепла ... 114
2.4.9. Особенности расчета радиационных притоков тепла для облачных случаев ... 116
3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ... 118
3.1. Исходные условия и постановка задачи математического моделирования ... 118
3.1.1. Исходная система уравнений локальных атмосферных процессов ... 123
3.1.2. Постановка краевых и начальных условий для системы уравнений гидротермодинамики ... 126
3.1.3. Модель пограничного слоя атмосферы с незакрепленной верхней границей воздушной массы ... 128
3.1.4. Замыкание системы уравнений гидротермодинамики относительно оператора турбулентного обмена ... 131
3.1.5. Общая структура и основные входные данные для реализации модели переноса в атмосфере ... 133
3.1.6. Требования к моделям, методике выходной информации, метеорологической информации и расчетов приземной концентрации отдельных ингредиентов от группы источников ... 135
3.2. Численная модель переноса и диффузии примесей с учетом классификации атмосферной устойчивости ... 137
3.2.1. Математическая модель ... 137
3.2.2. Метеорологические параметры ... 139

3.2.3. Численный метод ... 140
3.2.4. Параметризация источников выбросов ... 143
3.2.5. Иллюстративный пример ... 144
4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ... 146
4.1. Модели атмосферной циркуляции и распространения примесей в приземном слое атмосферы ... 146
4.1.1. Системы уравнений квазиоднородного приземного слоя ... 146
4.1.2. Поток тепла и влаги в почву ... 150
4.2. Вывод уравнений блочной модели переноса вредных примесей в приземном слое атмосферы и описание взаимодействий между блоками ... 156
4.3. Численные схемы блочной модели переноса вредных примесей в бароклинной атмосфере ... 162
4.4. Вычислительный эксперимент и его результаты ... 165
4.4.1. Метеорологические условия и состояние загрязнения ... 165
4.4.2. Зависимость загрязнения от метеорологических условий ... 166
4.4.3. Связь состояния загрязнения атмосферы от условий ее циркуляции ... 168
5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСАХ В НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТОДОБЫВАЮЩИХ РЕГИОНАХ ... 173
5.1. Анализ исходных данных параметров струи, истекающей из буровой скважины при аварии ... 174
5.2. Определение параметров струи, истекающей из буровой скважины при аварии ... 177
5.3. Процессы, определяющие перенос загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах ... 183
5.4. Модель расчета концентрации от нестационарного непрерывного источника при аварийном выбросе ... 193
5.5. Моделирование аварийных выбросов из глубоких скважин с использованием струйной модели ... 200
6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАССОЭНЕРГООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В АТМОСФЕРЕ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ГЕОСИСТЕМ ... 204
6.1. Экологическое картографирование районов технополиса ... 204
6.1.1. Построение геоэкологической карты с учетом орографии местности на примере Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения ... 204
6.1.2. Ранжирование районов технополиса по степени экологической безопасности ... 217
6.2. Разработка методов коррекции, управления и прогнозирования экологической ситуацией района технополиса ... 223
6.2.1. Построение геоэкологической карты распространения примесей с применением гидродинамической модели пограничного слоя атмосферы и его результаты ... 223
6.2.2. Прогнозирование экономического ущерба от загрязнения атмосферы ... 235
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ... 239
Приложение А. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ... 251
Приложение Б. ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ ... 332

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время характеристики загрязнения атмосферы рассматриваются как метеорологические величины. В связи с этим решение вопросов о нормировании вредных выбросов непосредственно зависит от учета условий рассеивания их в атмосфере и составления карты загрязнения территорий. Все эти мероприятия дают возможность следить на всей территории промышленного объекта за предельно допустимой концентрацией (ПДК). Поэтому выбор физико-математической модели расчета загрязнений территорий, разработка моделей управления качественным состоянием воздушного бассейна и метода инженерного расчета рассеивания, позволяющие получать адекватные результаты, являются актуальными.

Поскольку охрана окружающей среды становится важнейшим фактором, определяющим перспективы устойчивого развития экономики и социальной сферы, теоретическое обоснование и разработка конструкций высокоэффективных пылеулавливающих, аэрозолеосадительных модулей, отвечающих современным мировым экологическим стандартам, являются актуальными проблемами современной науки и техники.

Для более полного описания процессов переноса, диффузии и трансформации примесей, их необходимо рассматривать на базе физически достаточно богатой модели, учитывающей, по крайней мере, суточный ход изменчивости рассеивания в зависимости от метеорологических ситуаций, орографических и термических неоднородностей подстилающей поверхности. С этой целью модель динамики атмосферы дополним математической моделью переноса и трансформации примесей, далее, будем решать их совместно.

На настоящий момент, видимо, нет основания говорить о глобальном экологическом кризисе, хотя надо признать наличие крайне неблагоприятной экологической ситуации не только в рамках отдельных регионов, но и в планетарном масштабе. Наиболее показательные примеры в этом отношении – рост концентрации диоксида углерода, оксидов азота, серы и других загрязняющих веществ в атмосфере.

При оценке влияния атмосферного загрязнения на состояние здоровья людей следует базироваться на следующих основных тезисах:

– риск возникновения заболевания возрастает с ростом концентрации загрязнителя в воздухе, усредненной за некоторый период времени;

– риск нарушений здоровья может быть усилен за счет присутствия в атмосферном воздухе не одного, а нескольких загрязнителей;

– риск нарушений здоровья может быть усилен за счет существенных всплесков загрязнения, либо за счет постоянного изменения состояния окружающей среды, что затрудняет приспособление популяции к ее химическим характеристикам;

– риск является популяционной вероятностной характеристикой и может быть эффективно исследован на уровне показателей, характеризующих здоровье популяции в целом в большей степени, чем при исследовании индивидуальной реакции.

В связи с этим нами придавалось большое значение сбору и анализу различных показателей, характеризующих состояние здоровья и медико-демографической ситуации для жителей промышленных регионов Казахстана в сопоставлении с показателями загрязнения атмосферного воздуха.

Важно также видеть территориальный аспект проблемы, состоящий в том, что люди, проживающие в различных промышленных районах, испытывают разную медико-экологическую нагрузку на организм.

В настоящей работе впервые выполнена систематизация разнообразной информации о влиянии атмосферного воздуха на здоровье населения в промышленных регионах республики, а также проведены специальное исследование и моделирование возможной зависимости параметров здоровья от параметров состояния атмосферы.

Для эффективного исследования сложного объекта математическими методами требуется иметь комплекс моделей различных уровней и детализации, которые дополняют друг друга при взаимодействии (взаимном использовании). Взаимодействие может быть различным. Это могут быть расшифровка, детальная интерпретация в подобных моделях, решение принятых с помощью ориентированных моделей верхнего уровня. Могут быть и эксперименты с моделями нижнего уровня с целью уточнения параметров моделей верхнего уровня и т.д. Бывает и так, что требуется поставить массовые машинные эксперименты с готовой моделью с целью формирования необходимой статистики для решения какого-то круга задач, но громоздкость и детальность модели не позволяют это сделать при имеющихся вычислительных средствах. Тогда желательно построить менее подробную и точную, но существенно более оперативную модель с помощью имеющейся и уже с ней проводить массовые эксперименты. Весьма доказательна в этом отношении ситуация с существующими моделями водной и воздушной среды. Эти модели являются развитием известных в механике и физике гидродинамических моделей, дополненных моделями термодинамических и иных явлений. Они принципиально позволяют вести весьма точные расчеты характеристик гидродинамических, метеорологических, климатических явлений при полностью заданных исходных данных (входах). Эти характеристики необходимы для многих моделей природной среды разных временных и пространственных масштабов и далеко не всегда могут быть получены из несистематизированных наблюдений, какими располагает наука: систематизированные в должной мере наблюдения таких распределенных объектов чрезвычайно дорогостоящи и далеко не всегда осуществимы имеющейся аппаратурой. Дело осложняется тем, что входные факторы (метеорологические условия) имеют случайный характер и получение сколь либо устойчивых характеристик может быть обеспечено лишь достаточно большими статистическими выборами, что весьма трудно реализовать путем как наблюдений, так и расчетов на громоздких моделях. Вполне разумно в такой ситуации переходить от распределенных моделей к приближенным блочным моделям, поскольку основным фактором, определяющим большие объемы вычислений, является распределенность объекта. Реальный путь здесь задаться подходящей структурой, концепцией блочной модели из содержательных соображений, если работа ведется специалистом по данному объекту или совместно со специалистом, либо

из формальных соображений в противном случае. Неизвестные параметры блочной модели могут быть определены либо на основе упрощенного теоретического анализа исходной точной модели, либо на основе машинных экспериментов с нею.

Проблема численного прогноза погоды и связанное с ней численное моделирование общей циркуляции атмосферы, бурно развивающие области метеорологии, требуют больших усилии по развитию эффективных численных методов реализации применяемых моделей, улучшению их физической основы, испытанию различных подходов к обработке уравнений гидромеханики при построении рабочих уравнений модели, введению в уравнения второстепенных факторов, обычно отбрасываемых ввиду относительной малости, и практической оценке их роли при длительном интегрировании уравнений и т.д. Большое значение, особенно для моделей общей циркуляции, имеет дальнейшее развитие методов параметризации подсеточных процессов, играющих большую роль в энергетическом балансе атмосферы.

Моделирование реальной атмосферы с применением уравнений гидротермодинамики требует привлечения влажности как одного из важнейших параметров природы. Точное прогнозирование элементов водного баланса (влагосодержание, водность облаков, осадки, испарение) во многом предопределяет успех предсказания погоды. Особую трудность представляет моделирование процессов, связанных с фазовыми переходами воды в атмосфере.

Процессы конденсации, изменения термодинамического состояния атмосферы, приводят к существенному изменению циркуляции. Особенно важно выявление воздействия конденсационных процессов на крупномасштабные элементы циркуляции и наоборот.

В Послании Президента страны Н.А. Назарбаева народу Казахстана «Казахстан-2030» особое внимание уделено охране окружающей среды, так как защита окружающей среды становится сегодня одной из приоритетных задач современного мира. О необходимости сохранения чистоты окружающей среды изложено в статьях 31 и 38 Конституции Казахстана. Большое значение для совершенствования охраны окружающей среды имеют законы РК «Об охране окружающей среды» и «Об экологической экспертизе». Среди проблем защиты окружающей среды актуальной является охрана воздушного бассейна, так как загрязненный воздух ухудшает экологические условия. Большинство технологических процессов химических и металлургических производств, машиностроения, энергетики и сельского хозяйства сопровождаются большим количеством газовых выбросов, содержащих взвешенные твердые частицы. Проблема оценки влияния загрязнения окружающей среды на состояние здоровья населения сохраняет свою актуальность в современных условиях. Стратегией «Казахстан-2030», а также Государственной Программой «Здоровье народа» улучшение окружающей среды определено в качестве одного из основных инструментов оздоровления населения.

Для сохранения среды обитания требуется решать задачи ограничения выбросов действующих предприятий и оптимального размещения вновь создаваемых промышленных объектов с учетом допустимых нагрузок на экологически значимые зоны. Решение этих и других, возникающих здесь, задач требует использования математических моделей, описывающих распространения примесей в атмосфере от различных типов источников.

Атмосферный воздух, как основная среда обитания человека, в процессе взаимодействия с окружающей средой играет одну из ведущих ролей. От качества атмосферного воздуха во многом зависит стабильность взаимодействия человеческого организма с окружающей средой – процессы физического развития, заболеваемость, медико-демографические параметры. Атмосферный воздух не только воздействует на человека непосредственно, но и служит транспортирующей средой, обусловливая загрязнение почвенного покрова, водных источников, растительности и продуктов питания.

Известно, что степень загрязнения нижних слоев атмосферы вредными веществами зависит не только от технологических и конструктивных параметров, но и от ряда метеорологических факторов, которые определяют процесс распространения примесей в пограничном слое атмосферы. Этими факторами являются скорость ветра, термическая стратификация, орография местности, характер подстилающей поверхности и т.д.

Среди задач охраны окружающей среды большое значение имеют исследования закономерностей распространения атмосферных примесей и особенностей их пространственно-временного распределения. Они являются основой для объективной оценки состояния и тенденции изменений загрязнения воздушного бассейна, а для также разработки возможных мероприятий по обеспечению чистоты воздуха. В настоящее время для описания процессов переноса и диффузии примесей используется ряд математических моделей, основанных на решении уравнения турбулентной диффузии. При моделировании процессов распространения примесей важную роль играет выбор численных алгоритмов, обладающих свойствами консервативности и монотонности. Такими свойствами обладают численные алгоритмы, используемые нами в данной работе. Итак, можно констатировать, что вопросы загрязнения атмосферы промышленных регионов представляет собой самостоятельную, актуальную, социально-значимую, экологическую проблему. Эти вопросы составляют предмет исследования данной работы и входят в общую характеристику работы.

Работа состоит из ведения, шести разделов.

В первом разделе исследованы и проанализированы промышленные выбросы и оценена экологическая обстановка окружающей среды различных промышленных регионов Казахстана.

На Карачаганакском нефтегазоконденсатном месторождении определены 9 основных источников выбросов вредных веществ КНГКМ. Рассмотрены орографическое описание, климат и климатические особенности загрязнения атмосферы в Карачаганакском районе. Выявлены сезонные колебания загрязнения и большие изменчивости в суточных выбросах загрязнения. Установлена зависимость загрязнения от метеорологических условий и связь состояния загрязнения атмосферы от условий ее циркуляции.

Далее изучены современное состояние атмосферного воздуха промышленных регионов, климат и метеорологические особенности, современное состояние экологической обстановки природной среды Павлодарской области в динамике. Систематизирована разнообразная информация о влиянии атмосферного воздуха на здоровье населения, а также проведено специальное исследование и моделирование возможной зависимости параметров здоровья от параметров состояния атмосферы и проанализирована медико-демографическая ситуация региона.

Проведенные в первом разделе работы указывают на необходимость осуществления дальнейших действий по снижению неблагоприятного влияния загрязнения атмосферы на здоровье в рамках Стратегии «Казахстан-2030», где говорится о необходимости «нарастающих усилий» по улучшению окружающей среды.

Сохраняет свою актуальность также разработка приемов и методов снижения риска атмосферного загрязнения для здоровья путем повышения иммунного статуса населения региона. Все это в целом может дать значимый социальный и экономический эффект.

Во втором разделе моделированы глобальные метеорологические процессы реальной атмосферы.

Степень загрязнения нижних слоев атмосферы вредными веществами зависит не только от технологических и конструктивных параметров, но и от ряда метеорологических факторов, которые определяют процесс распространения примесей в пограничном слое атмосферы. Этими факторами являются скорость ветра, термическая стратификация, орография местности, характер подстилающей поверхности и т.д. Поэтому, для более полного описания процессов переноса, диффузии и трансформации примесей, их необходимо рассматривать на базе модели, учитывающей эти факторы. С этой целью модель динамики атмосферы дополнена математической моделью переноса и трансформации примесей с учетом неровностей земной поверхности и с учетом в уравнениях движения неоднородности атмосферных сред, а также с уравнением притока тепла решена совместно.

По мере развития мощности ЭВМ появляется возможность вводить в численные модели физические факторы, приближающие их к условиям реальной атмосферы. Сюда, в первую очередь, необходимо отнести введение в модели механизма фазовых переходов воды в атмосфере, проблему параметризации явлений подсеточного масштаба в прогностических моделях, детальный учет процессов в планетарном пограничном слое, влияние радиационных и турбулентных переносов энергии на развитие крупномасштабных процессов, учет геофизических свойств Земли и целого ряда других явлений. Поэтому, во втором разделе выявлены основные уравнения динамики реальной атмосферы.

Моделирование реальной атмосферы с применением уравнений гидротермодинамики требует привлечения влажности и влияния конденсации на элементы циркуляции, как одного из важнейших параметров природы. Помимо проблемы включения фазовых процессов в гидротермодинамические уравнения, здесь также уделено внимание к представлению в уравнениях движения массовых сил и на возможность исключения предположения о равенстве нулю горизонтальных градиентов потенциала силы тяжести.

В работах различных ученых обращено внимание на то, что помимо чисто геофизических причин потенциал силы тяжести горизонтально неоднороден в результате влияния самой атмосферы. Эта неоднородность особенно существенно сказывается на высотах. Поэтому модели прогноза и исследования процессов верхней атмосферы уточнены путем использования более точных представлений массовых сил в уравнениях движения.

Исследованы бароклинные процессы в сжимаемой атмосфере. Выведены уравнения для полной производной от давления и температуры в насыщенной

атмосфере и для изменения давления применительно к сглаженным величинам во влажной атмосфере. Оценена роль турбулентной диффузии.

Изучена динамика вертикальных движений в облачной атмосфере. Выведено уравнение для вертикальной скорости в насыщенной атмосфере. Определены вертикальные скорости в насыщенной атмосфере и во влажной ненасыщенной атмосфере. Проведены расчеты вертикальных движений в многослойной облачной атмосфере и вблизи облаков с учетом фронтальных поверхностей при расчете вертикальных движений.

Далее предложена численная модель бароклинных процессов атмосферы и краткосрочного прогноза. Выведены основные уравнения атмосферной циркуляции с учетом приземного трения и орографии, а также турбулентного обмена между океаном и атмосферой. Предложена конечно-разностная схема решения этой задачи и полуявная схема реализации прогностической модели. Проведена экспериментальная проверка алгоритмов, описывающих динамический эффект орографии и трения, моделирование притока тепла от океана с учетом радиационного притока тепла.

В третьем разделе, с целью оценки экологической обстановки, описаны процессы переноса загрязняющих веществ в пограничном слое атмосферы в зависимости от ее циркуляции.

Как известно, среди задач охраны окружающей среды большое значение имеют исследования закономерностей распространения атмосферных примесей и особенностей их пространственно-временного распределения. Проведен выбор оптимальных моделей для решения задач охраны окружающей среды, а также алгоритмов и программ, необходимых при применении этого комплекса для изучения условий формирования атмосферных циркуляций локальных областей под влиянием изменений термических и орографических характеристик поверхности. Выведены основные уравнения атмосферной циркуляции и распространения примесей в пограничном слое атмосферы для модельной оценки экологической обстановки. Выявлены общая структура и основные входные данные для реализации модели переноса в атмосфере. Приведен решенный на основе комплекса моделей класс практических и исследовательских задач по изучению локальной циркуляции в ограниченной области. Определены требования к моделям, методике выходной информации, метеорологической информации и расчетам приземной концентрации отдельных ингредиентов от группы источников.

С помощью диффузионных и гидродинамической моделей описаны процессы распространения вредных примесей в атмосфере. Пространственная модель локальных атмосферных процессов со свободной верхней границей, развивающихся над термически и орографически неоднородной подстилающей поверхностью, содержит следующие основные блоки:

– блок реализации трехмерной системы нестационарной нелинейной системы уравнений гидротермодинамики пограничного слоя атмосферы;

– блок тепло- и влагообмена в почве;

– блок трехмерной нестационарной модели переноса и диффузии примесей в пограничном и приземном слое атмосферы.

Модель локальных атмосферных процессов со свободной верхней границей была адаптирована для моделирования атмосферной циркуляции региона. Для

исследования локальных атмосферных процессов, происходящих в пограничном слое, используем математическую модель, основанную на системе уравнений гидротермодинамики. Численные расчеты и иллюстративные примеры приведены в шестом разделе.

Выбранные математические модели ориентированы на решение широкого класса задач, возникающих при оценке антропогенной нагрузки на окружающую среду посредством свойств поверхности земли, и загрязнение воздушного бассейна.

В четвертом разделе моделированы процессы переноса вредных примесей в приземном слое атмосферы. В слое вблизи поверхности земли (толщиной около 10–100 м), так называемом приземном слоем, наблюдаются максимальные градиенты метеорологических элементов. Важной особенностью приземного слоя, в значительной мере оправдывающей выделение его в рамках планетарного пограничного слоя, является относительное постоянство по высоте турбулентных потоков.

Получены модели атмосферной циркуляции и распространения примесей в приземном слое атмосферы, где основную роль играют системы уравнений квазиоднородного приземного слоя, и учтены поток тепла и влаги в почву. Система уравнений гидротермодинамики замкнута относительно оператора турбулентного обмена.

Далее выведены уравнения блочной модели переноса вредных примесей в приземном слое атмосферы и описаны взаимодействия между блоками. Характеристики, необходимые для многих моделей природной среды и позволяющие рассчитать весьма точно гидродинамические, метеорологические, климатические явления, не всегда могут быть получены из несистематизированных наблюдений, какими располагает наука. Вполне разумно в такой ситуации переходить от распределенных моделей к приближенным блочным моделям, поскольку основным фактором, определяющим большие объемы вычислений, является распределенность объекта. Рассмотрены процедуры построения блочной модели локального климата, ее взаимодействия и принципы разбиения области моделирования

Разработаны численные схемы блочной модели переноса вредных примесей в бароклинной атмосфере. Проведены численные расчеты переноса вредных веществ в приземном слое атмосферы с учетом влияния подстилающей поверхности.

В пятом разделе моделированы распространения вредных выбросов при аварийных выбросах в нефтегазоконденсатодобывающих регионах. Составлена программа вычисления и проведен расчет на вычислительной машине. Разработанные программные средства могут быть использованы для численных прогностических экспериментов по моделированию переноса примесей в атмосфере от поля источников с различной интенсивностью и плотностью загрязняющих веществ.

Далее указаны предпосылки к нейтрализации сероводородного облака. С целью прогнозирования распространения сероводорода при аварийных выбросах в атмосферу определена математическая постановка и алгоритм решения задачи. Для решения этой проблемы предложен полуэмпирический подход к прогнозированию перемещения зон экстремально высокого загрязнения воздуха сильнодействующими ядовитыми веществами.

Выведена модель расчета концентрации от нестационарного непрерывного источника при аварийном выбросе. Изложены три возможных подхода к решению задачи динамического прогноза. Анализ возможности использования

методов численного моделирования показывает, что полуэмпирический подход имеет наиболее развитую теоретическую базу и в принципе позволяет учитывать практически все основные факторы, влияющие на процессы рассеяния сильнодействующих ядовитых веществ. Детально анализирована комбинированная модель, которая является наиболее общей, в частности, она использует более сложные характеристики метеоситуации.

Обычно, аварийная ситуация на нефтегазодобывающих месторождениях сопровождается выбросами в атмосферу холодной и горячей смеси сероводородных продуктов. При этом под воздействием повышенного давления внутри нефтегазоносного пласта формируется струя смеси или факел, в которых исходное вещество преобразуется в продукты сгорания. Затем они перемешиваются с воздухом посредством механизма турбулентности. Таким образом, распространение аварийных выбросов в приземном слое воздуха можно свести к задаче рассеяния турбулентной струи, поэтому далее рассмотрены возможности моделирования аварийных выбросов с использованием струйной модели.

Проанализированы и распределены на три группы исходные данные параметров струи, истекающей из буровой скважины при аварии. Из анализа физико-химических и токсических свойств вредных веществ, выбрасываемых источниками КНГКМ, выявлено, что наибольшую опасность представляют сероводород, окислы азота и серы.

Определены также параметры струи, истекающей из буровой скважины при аварии. В результате проведенных расчетов показано, что кинематические (скорость) и геометрические (вертикальные и горизонтальные) характеристики струи относительно слабо зависят от термодинамических и физико-химических свойств истекающей из скважины горючей смеси, от начальной температуры, от состава смеси. Результаты расчетов показывают, что максимальная высота подъема истекающих из скважины газов и продуктов их горения составляет порядка $H = 200$ м, при этом максимальные горизонтальные размеры струи, содержащей продукты сгоревших газов, меньше 70 м.

Выявлено также, что основные процессы горения и турбулентного перемещения истекающих из скважины газов с окружающей атмосферой происходят на начальном участке струи.

В шестом разделе приведено практическое применение результатов вычислительного эксперимента математической модели массоэнергообменных процессов, протекающих в атмосфере природно-технических геосистем. Экологическое картографирование районов технополиса. Построена геоэкологическая карта с учетом орографии местности на примере Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения с учетом силы тяжести, орографии местности (неровности земной поверхности), баланса влаги в атмосфере, притока тепла, в том числе и радиационного притока тепла, неоднородности атмосферной среды, ненасыщенной (насыщенной) атмосферы при наличии конденсации, вертикального движения в облачной атмосфере, а также с учетом фронтальных поверхностей. Полученные численные значения метеорологических параметров (температура, скорость ветра, давление и др.) использовались при численном решении уравнений переноса примесей. С учетом данных раздела 1 и табл. 33 получены геоэкологические карты местности для Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения (геоэкологические карты

переноса вредных примесей в конвективных и в инверсионных условиях). Построена геоэкологическая карта распространения вредных примесей на основе диффузионных моделей. Построение геоэкологической карты распространения примесей, используя модель пограничного слоя атмосферы с незакрепленной верхней границей воздушной массы с применением гидродинамической модели пограничного слоя атмосферы и его результаты.

Произведено расчетное прогнозирование экономического ущерба от атмосферного загрязнения в регионе Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения, а также анализирован экономический эффект природоохранных мероприятий и рассчитан предотвращенный ущерб в результате воздухоохранных мероприятий.

Получены следующие результаты:

– выполнена систематизация разнообразной информации о влиянии атмосферного воздуха на здоровье населения, а также проведено специальное исследование;

– на основе исследования, анализа и оценки хозяйственных воздействий промышленных предприятий республики на экологическое состояние воздушного бассейна выявлена зависимость состояния здоровья населения от загрязнения атмосферы и разработана модель влияния атмосферного загрязнения на состояние здоровья населения;

– раскрыта физическая картина влияния загрязнения воздушного бассейна промышленными выбросами на здоровье человека;

– разработана математическая модель глобальных метеорологических процессов реальной атмосферы с учетом массовых сил, орографии земной поверхности, баланса влаги в атмосфере, притока тепла, в том числе и радиационного притока тепла, неоднородности атмосферных сред, ненасыщенной (насыщенной) атмосферы при наличии конденсации, вертикального движения в облачной атмосфере, а также с учетом фронтальных поверхностей атмосферного воздуха;

– разработаны методы расчета, а также поставлена и решена задача переноса и рассеивания вредных веществ в воздушном бассейне (пограничном и приземном слоях атмосферы) с учетом атмосферных процессов, используя методы гидротермодинамики и многофазных сред, термодиффузии;

– созданы оперативные математические аппараты, учитывающие влияние деятельного слоя почвы, свободной незакрепленной границы, тепломассообмена, вертикальной термодиффузии, а также фазового перехода;

– разработаны математические модели распространения вредных веществ при аварийных выбросах в атмосферу, анализированы исходные данные параметров струи, истекающей из буровой скважины при аварии, и определены параметры струи, выявлена применимость моделей струйного течения при аварийном выбросе. Разработана модель расчета концентрации вредных веществ при аварийном непрерывном выбросе;

– создана геоэкологическая карта с учетом орографии местности и атмосферных процессов, проведено экологическое картографирование районов технополиса;

– произведено расчетное прогнозирование экономического ущерба от атмосферного загрязнения, анализирован экономический эффект природоохранных мероприятий и рассчитан предотвращенный ущерб в результате воздухоохранных мероприятий.

1. ИНФОРМАЦИОННОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАССОЭНЕРГООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В АТМОСФЕРЕ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ГЕОСИСТЕМЫ

В первом разделе проведен анализ и инициализация исходной метеоинформации и параметров выбросов источников вредных веществ Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения (КНГКМ) и окончательно определены 9 основных источников выбросов вредных веществ. Рассмотрены орографическое описание, климат и климатические особенности загрязнения атмосферы в Карачаганакском районе. Климатические особенности указаны по отдельным элементам и явлениям погоды для каждого месяца в отдельности. Рассмотрены сезонные колебания загрязнения. Выявлены сезонные колебания загрязнения. В марте-июне она несколько увеличивается, а с июля по февраль уменьшается. Выявлены большие изменчивости в суточных выбросах загрязнения. На эти особенности выбросов загрязнения необходимо обратить серьезное внимание.

Установлены зависимость загрязнения от метеорологических условий и связь состояния загрязнения атмосферы от условий ее циркуляции. Показаны возможности использования синоптического анализа для прогнозирования загрязнения атмосферы на срок до 5 дней. Изучены современное состояние атмосферного воздуха промышленных регионов, климат и метеорологические особенности, современное состояние экологической обстановки природной среды Павлодарской области в динамике.

В работе выполнена систематизация разнообразной информации о влиянии атмосферного воздуха на здоровье населения и моделирование возможной зависимости параметров здоровья от параметров состояния атмосферы. Исследованы корреляционные связи между параметрами здоровья и параметрами состояния атмосферы, из числа которых отобраны статистически значимые. Проанализирована медико-демографическая ситуация промышленного региона. Сформирован банк данных о состоянии атмосферы и заболеваемости населения. Анализируя медико-демографическую ситуацию и обусловленность влиянием атмосферного загрязнения, на основе выполненного статистического анализа и математического моделирования сделаны следующие выводы:

– загрязнение атмосферного воздуха оказывает существенное влияние на состояние здоровья населения;

– неблагоприятное состояние окружающей среды в исследуемых районах отражается на демографических показателях, общей заболеваемости, физическом развитии детей, уровне риска возникновения патологий дыхательной, эндокринной, кроветворной и иных важных систем человеческого организма.

Проведенные в разделе работы указывают на необходимость осуществления дальнейших действий по снижению неблагоприятного влияния загрязнения атмосферы на здоровье в рамках Стратегии «Казахстан-2030», где говорится

о необходимости «нарастающих усилий» по улучшению окружающей среды. Сохраняет свою актуальность также разработка приемов и методов снижения риска атмосферного загрязнения для здоровья путем повышения иммунного статуса населения региона. Все это в целом может дать значимый социальный и экономический эффект.

Все эти материалы являются исходными данными (банка данных) при математическом моделировании, численном анализе и оценке экологической обстановки этих промышленных регионов.

1.1. Физико-географическое описание и климатические особенности природно-технической геосистемы промышленных регионов Республики Казахстан на примерах Карачаганакского нефте газоконденсатного месторождения и Павлодарской области

1.1.1. Физико-географическое описание и климатические особенности природно-технической геосистемы

Исходная метеорологическая информация для проведения математического моделирования была представлена в виде имеющихся стандартных метеорологических таблиц и справочников наблюдений за метеорологическим режимом в районе газоконденсатного месторождения. Метеорологические наблюдения, хотя и нерегулярно и с различной степенью подробности, проводились в Карачаганаке, Жарсуате, Тунгуше, Жанаталапе, Березовке [1–11].

С целью оценки качественной картины распространения вредных примесей в атмосфере и проверки работоспособности моделей для моделирования были выбраны две основные типичные метеоситуации: одна из них соответствует конвективным атмосферным условиям в летнее время года, а другая устойчивость атмосферным условиям (инверсии) – в зимнее время года. Метеопараметры этих ситуаций приведены в табл. 1.

Таблица 1

Метеопараметры исходных метеостанций

Метеопараметры	Тип метеопараметров	Пункты наблюдения				
		Карачаганак	Жарсуат	Березовка	Тунгуш	Жанаталап
Скорость приземного ветра, м/с	1 2	2 5	1 5	2,6 5	1 5	1 5
Направление приземного ветра	1 2	ЮВ ЮЗ	ЮВ ЮЗ	ЮВ ЮЗ	ЮВ ЮЗ	ЮВ ЮЗ
Температура воздуха вблизи, °С	1 2	24,8 0	24,1 0	24,1 0	24,1 0	24,1 0
Высота пограничного слоя атмосферы (РСА) (м)	1 2	2500 600	1500 600	1500 600	1500 600	1500 600
Температура воздуха на границе РСА	1 2	14 2	14 2	14 2	14 2	14 2
Направление геострафического ветра	1 2	З Ю	З Ю	З Ю	З Ю	З Ю

Здесь тип метеоситуации с номером 1 соответствует конвективным летним условиям, имевшим место 3.07.89, а 2 – инверсионным условиям 27.02.89.

Территория Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения (КНГКМ) лежит в зоне умеренных широт. В зимний период в этот район проникает отрог Азиатского антициклона, сопровождающийся ясной морозной погодой. Летом территория находится под влиянием перегретых воздушных масс с Туранской низменности.

Климат района резко континентальный. Высокая континентальность проявляется в резких температурных контрастах дня и ночи, зимы и лета, в быстром переходе от зимы к лету. Зима здесь холодная, но не продолжительная, лето жаркое и довольно длительное. Средняя продолжительность безморозного периода составляет 139–142 дня. Самым холодным месяцем является январь со средней месячной температурой воздуха –14 °С, –14,5 °С, самым жарким – июль со средней месячной температурой +22 °С, +23 °С.

Хотя территория Бурлинского района представляет собой наиболее влагообеспеченный район области, условия увлажнения рассматриваемой территории очень жесткие. Годовая сумма осадков составляет 275–300 мм. В течение года осадки выпадают неравномерно. В годовом ходе наблюдается два максимума: первый приходится на июль, второй в большинстве случаев – на октябрь. Устойчивый снежный покров сохраняется обычно 120–130 дней, высота его достигает 25–30 см, запасы влаги в снеге 75–95 мм.

В среднегодовой розе ветров преобладают ветры южных направлений, а в летние месяцы – западных. Причем скорости ветра в зимние месяцы более высокие, чем в летние месяцы.

Весенние процессы в этом регионе наступают обычно в конце марта, а устойчивый переход температуры воздуха через 0 °С к положительным значениям осуществляется в начале и середине первой декады апреля. Средняя месячная температура воздуха от марта до апреля повышается на 12–13 °С, однако потепление проходит скачкообразно, с периодическими похолоданиями вплоть до заморозков. Последние заморозки вероятны в первой половине мая (8 мая).

Устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через +5 °С наступает 13–17 апреля, через +15 °С – в середине мая. Таким образом, продолжительность весны в условиях температурных границ составляет всего лишь полтора месяца.

Снежный покров сходит обычно в конце марта – начале апреля. Весна довольно засушливая, осадки неустойчивы: в отдельные годы их выпадает в 3–4 раза больше нормы, а иногда отмечаются только следы (менее 0,1 мм).

В весеннем сезоне очень повышена ветровая деятельность и отмечается наибольшее число дней с сильным ветром, достигающим 15 м/с и более.

Летний сезон характеризуется жаркой, очень сухой и ясной погодой. Продолжительность солнечного сияния к возможной продолжительности в летние месяцы составляет 70–80 %. Самый жаркий летний месяц – июль. Абсолютный максимум температуры воздуха достигает 41 °С. Суточные амплитуды температуры воздуха летом характеризуются наибольшими величинами (14–15 °С), почти вдвое превышающими зимние амплитуды (8–9 °С). Продолжается летний сезон около четырех месяцев.

Сумма осадков за теплый период (V–IX) составляет 125–130 мм. Продолжительность периодов без дождей иногда может достигать 1,5–2 месяцев.

Летом резко выражена сухость воздуха. Средняя относительная влажность воздуха в 13 часов дня колеблется в пределах от 34 до 37 %, а число дней с относительной влажностью менее 30 % составляет в среднем 13–16 за месяц. В летний период в этом регионе довольно часты суховые, пыльные бури. Осень наступает обычно во второй половине сентября, когда отмечается переход температуры воздуха через + 15 °С к более низким значениям.

Устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через +5 °С наступает обычно в середине октября, а через 0 °С – в начале ноября.

Первые осенние заморозки, как правило, наступают в последней пятидневке сентября (28.IX), в отдельные годы ранние заморозки наблюдались в начале сентября и даже в конце августа (29.YIII).

Для осени характерны меньшие, чем летом, среднесуточные амплитуды температуры воздуха, увеличение облачности, уменьшение осадков.

Зима в этом районе характеризуется преобладанием пасмурной погоды. Средняя температура воздуха самого холодного зимнего месяца (января) составляет 14–15 °С мороза. Для зимних месяцев района КНГКМ характерна большая неустойчивость температуры. Возможны суровые морозы, достигающие –44 °С. Вместе с тем возможны и кратковременные оттепели с дневными температурами порядка 6–10 °С тепла.

Устойчивый снежный покров образуется в конце ноября – начале декабря. В отдельные годы возможно образование раннего снежного покрова – в начале ноября, а в некоторые зимы снега не бывает до конца декабря. Высота снежного покрова достигает 25–30 см, что обеспечивает запасы влаги в нем 75–95 мм.

Продолжительность зимы с устойчивым снежным покровом около 4-х месяцев, но в отдельные годы зима может быть менее длительной.

Зимние месяцы характеризуются повышениями скорости ветра. Особенно сильные ветры наблюдаются в феврале – марте, что вызывает развитие метелей и поземок, обусловливающих сдувание снега с полей.

Частота метелей составляет в среднем 20–30 дней за сезон.

Павлодарская область характеризуется пустынным характером растительности, малыми заселенностью и хозяйственной освоенностью. Рельеф территории равнинный с элементами техногенного микрорельефа. Перепад отметок высот незначительный и не оказывает ощутимого влияния на характер рассеивания в атмосфере загрязняющих веществ.

Климат региона отличается резкой континентальностью, продолжительной и, как правило, суровой зимой с метелями, непродолжительным и жарким летом. Весной погода характеризуется изменчивостью температуры воздуха, частыми возвратами холодов и поздними заморозками.

В условиях сухого резкоконтинентального климата режим солнечной радиации является одним из основных факторов, определяющих погодные условия. Наибольшая облачность отмечается в холодное полугодие, когда вероятность пасмурного неба составляет от 40 до 70 %. Продолжительность солнечного сияния зимой невелика: 3–4 часа в сутки. Повторяемость ясных дней летом

увеличивается (до 70% за период). Продолжительность солнечного сияния достигает 2460 часов в год. Весь район относится к зоне ультрафиолетового комфорта.

По СНиП (Строительные Нормы и Правила) рассматриваемая территория относится к строительно-климатическому подрайону 1-Б, характерной особенностью которого является чрезвычайно сухой зимний период.

Средняя месячная температура воздуха – одна из основных характеристик термического режима территории (табл. 2).

Таблица 2

Средняя месячная температура воздуха, °С

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
–17,5	–17,1	–9,3	4,4	13,3	19,4	21,4	18,5	12,2	3,6	–7,1	–14,3	2,3

Средняя годовая температура воздуха в городе Павлодаре составляет 2,3 °С. В отдельные годы она может изменяться в пределах от –0,6 до 5,2 °С.

Январь является типичным зимним месяцем. Средняя многолетняя январская температура составляет –17,5 °С. Январь 1969 года (–31,8 °С) зарегистрирован как самый холодный, а январь 1983 (–9,7 °С) – самый теплый.

Повышение средней многолетней температуры от января к февралю незначительное, поскольку циркуляционные и радиационные условия этих месяцев близки между собой. От февраля к марту, с увеличением прихода солнечной радиации, отмечается значительное повышение температуры воздуха ($\Delta = 7{,}8$ °С). Для апреля характерным является наибольшее в году повышение температуры, что вызвано сменой отрицательного радиационного баланса на положительный и значительной перестройкой барико-циркуляционных условий ($\Delta = 13{,}7$ °С). Средние месячные температуры апреля в целом положительные, за исключением 1930 (–0,8 °С), 1934 (–2,6 °С), 1954 (–0,3 °С), 1964 (–0,9 °С) и 1979 (–0,7 °С) годов. Средняя многолетняя температура апреля составляет 4,4 °С. Интенсивность нарастания температуры воздуха от месяца к месяцу в последующем уменьшается. Так, от апреля к маю изменение температуры составляет 8,9 °С, и средняя температура мая равна 13,3 °С. От июня к июлю средняя температура повышается на 2,0 °С. Июль является самым жарким месяцем (21,4 °С).

От июля к августу начинается медленный спад температуры, в последующем постоянно увеличивающийся. Лето является наиболее термически устойчивым периодом года. Значительное снижение температуры на 8,6 °С наблюдается в период от сентября к октябрю. Это связано со значительным уменьшением радиационного баланса и перестройкой на зимний режим барического поля и циркуляции. В октябре средняя месячная температура воздуха остается положительной и составляет 3,6 °С. От октября к ноябрю температура понижается на 10,7 °С, а от ноября к декабрю на 7,2 °С. Средние температуры декабря колеблются в отдельные годы от –6,4 до –27,7 °С.

К числу основных показателей режима температуры воздуха следует отнести величину годовой амплитуды ее колебания, определяемой по разности между температурой самого теплого (июль) и самого холодного (январь) месяцев года.

Соответствующие данные дают представление о степени континентальности климата. Как известно, чем больше годовые амплитуды температуры и другие показатели климата, тем резче выражена его континентальность.

Величина годовой амплитуды в Павлодаре составляет 38,9 °С. Температура воздуха – крайне изменчивый метеорологический элемент. В отдельные годы месячные температуры воздуха отличаются от средней многолетней. Вычисленные средние отклонения от средних многолетних по месяцам представлены в табл. 3.

Таблица 3

Отклонения средних месячных температур воздуха от многолетних, °С

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднее	3,1	3,0	2,7	2,3	1,6	1,4	1,3	1,2	1,3	1,5	3,2	3,3
Наибольшее положительное	7,8	7,4	6,9	6,1	4,0	3,7	3,8	3,7	3,7	4,4	6,5	7,9
Наибольшее отрицательное	–14,3	–9,7	–6,6	–7	–3,8	–3,7	–4,4	–3,0	–4,5	–6,4	–9,4	–13,4

Из табл. 3 видно, что средние отклонения средних месячных температур воздуха от нормы имеют выраженный годовой ход с максимумом в декабре. Наименьшие средние отклонения отмечаются летом. В особо суровые зимы отклонения средних месячных температур от нормы могут достигать от 10 до 13 °С, а в исключительных случаях даже 14,3 °С (1969 год).

Крайние значения положительных отклонений зимней средней месячной температуры воздуха от нормы несколько меньше указанных выше отрицательных отклонений, но они также значительны и достигают 7,9 °С. В летние месяцы предельные положительные и отрицательные отклонения температуры воздуха от нормы значительно меньше и составляют 3–4 °С.

Большой интерес представляют данные о повторяемости дней с высокими и низкими средними суточными температурами воздуха. Так, число дней со средней суточной температурой выше 25 °С в среднем многолетнем составляет за год 12,5 дня. Если в июле в среднем многолетнем наблюдается 5,7 дня со средней суточной температурой выше 25 °С, то к весне и осени повторяемость их быстро убывает. В сентябре и апреле таких дней не отмечается. Что касается дней с низкими средними суточными температурами воздуха, то в январе число дней с температурой ниже –25 °С составляет 5,5.

Для Казахстана характерны резкие колебания температуры воздуха. Абсолютная амплитуда температуры воздуха, т.е. разность между наивысшей и наинизшей суточными температурами за год, значительна и колеблется в пределах от 63 до 82 °С.

Абсолютные амплитуды в годовом ходе имеют максимум в марте, а минимум – летом (август) и составляют 61 и 40 °С, соответственно. Годовой ход абсолютных максимумов и абсолютных минимумов, в общем, аналогичен годовому ходу средней температуры воздуха, т.е. наибольшие их значения отмечаются летом, а наименьшие – зимой (табл. 4).

Таблица 4

Абсолютный максимум и абсолютный минимум температуры воздуха, °С

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
Абсолют. максимум	4	5	23	34	38	42	41	40	35	29	18	7	42
Средний абсолют. максимум	−1	0	6	24	31	35	35	34	29	21	8	1	19
Абсолют. минимум	−47	−44	−38	−27	−12	−2	5	0	−8	−22	−40	−46	−47
Средний абсолют. минимум	−35	−34	−28	−11	−2	5	10	5	−2	−10	−25	−32	−13

Абсолютный минимум достигает в январе −47 °С (1907 год). Число дней с минимальной температурой воздуха ниже −35 °С за период с ноября по март в многолетних оценках составляет 4,1 дня. Однако, абсолютный минимум температуры, как величина случайная, не всегда может быть достаточно полной и устойчивой характеристикой морозности. Наиболее удобным и надежным индексом в этом отношении следует считать средний многолетний минимум температуры воздуха, полученный путем осреднения абсолютных минимумов за большой период лет (табл. 4). Число дней с максимальной температурой воздуха выше 35 °С за период с мая по август составляет 2,9 дня.

О степени континентальности климата можно судить не только по годовым, но и по суточным амплитудам температуры воздуха (табл. 5). Так, суточные амплитуды имеют хорошо выраженный годовой ход. В летние месяцы (июнь) средние суточные амплитуды наибольшие, а в холодное время года (ноябрь), наоборот, наименьшие. В отдельные дни возможны колебания амплитуды температуры воздуха, достигающие 30,4 °С. Столь большие амплитуды имеют место в январе.

Межсуточная изменчивость температуры воздуха в годовом ходе меняется от 1,9 °С (июль) до 45 °С (декабрь). Устойчивые морозы устанавливаются в среднем многолетнем 29 октября. Конец устойчивых морозов наступает 1 апреля. Длительность периода с устойчивыми морозами составляет 153 дня. Максимальная продолжительность зимних морозов достигала 172 дня в 1976–1977 году. Особенностью климата являются поздневесенние и раннеосенние заморозки, которые представляют собой одно из наиболее неблагоприятных явлений погоды для сельского хозяйства. Весеннее время, как отмечалось выше, отличается наиболее интенсивным в году ростом температуры воздуха, однако ее повышение обычно идет неравномерно.

Даты последних весенних и первых осенних заморозков колеблются из года в год в больших пределах. Средняя многолетняя дата последнего весеннего заморозка падает на 13 мая, первого осеннего – на 21 сентября. Продолжительность безморозного периода составляет 130 дней. Самый ранний заморозок был отмечен 2 сентября 1984 года, а самый поздний весенний заморозок – 3 июня 1984 года. Максимальная продолжительность безморозного периода составила 174 дня (1988 год), минимальная – 90 дней (1984 год).

Таблица 5

Средняя суточная амплитуда температуры воздуха, °С

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
Средняя	4	5	23	34	38	42	41	40	35	29	18	7	42
Максимальная	–1	0	6	24	31	35	35	34	29	21	8	1	19
Минимальная	–47	–44	–38	–27	–12	–2	5	0	–8	–22	–40	–46	–47

Лето в среднем многолетнем наступает 24 мая и продолжается 99 дней. Осень имеет продолжительность 58 дней, начиная со 2 сентября. Наиболее продолжительным лето было в 1962 году (138 дней), а наиболее коротким (73 дня) – в 1995 году.

Для практических целей интересны такие показатели температуры воздуха, как расчетные зимняя вентиляционная температура (средняя температура наиболее холодной части отопительного периода, составляющая 15 % длительности всего отопительного периода), температура самой холодной пятидневки и средняя температура отопительного периода и его продолжительность.

Для Павлодара расчетная вентиляционная температура наружного воздуха равна –19,4 °С. Расчетная температура самой холодной пятидневки составляет –34 °С. Отопительный сезон начинается 3 октября и продолжается 205 дней до 26 апреля. Средняя температура отопительного сезона составляет –8,3 °С.

Основным фактором самоочищения атмосферного воздуха являются осадки, но для данного района вымывающая способность осадков не велика. Годовое количество осадков на территории составляет 200–300 мм, в отдельные годы – 300–350 мм. Среднегодовое количество осадков равно примерно 280 мм. Из них порядка 70 % приходится на теплый период года (апрель-октябрь) в виде интенсивных ливней. Весной, в период вегетации растений, количество осадков незначительно, а в отдельные годы вообще может не выпадать дождей. Тогда в сочетании с высокой температурой воздуха может наступить атмосферная засуха, которая повторяется 3–4 раза за 10 лет. В зимний период года (ноябрь-апрель) образуется устойчивый снежный покров, который держится в течение 135–143 дней. Высота снежного покрова по территории составляет в среднем 20–25 см (при максимуме – 52 см). Сильные ветры значительно перераспределяют снежный покров, почти полностью сдувая его с открытых плоских участков в западины и котловины озер. Незначительный снежный покров в сочетании с сильными морозами приводит к глубокому промерзанию почвы (до 1,5–2 м).

Средняя относительная влажность воздуха наиболее теплого месяца – 58 %, наиболее холодного – 80 %. Наиболее засушливыми месяцами являются май, июнь и июль. В условиях высоких температур и дефицита влажности, постоянных ветров испарение в несколько раз превышает годовую сумму осадков. Среднее многолетнее испарение с водной поверхности за период апрель-октябрь в регионе составляет порядка 790 мм. Испарение резко (в 14–16 раз) возрастает в апреле-мае и достигает максимума в июне-июле.

Ветровые условия на территории почти однородны. В суточном ходе ветер усиливается днем до 4–5 м/с, ослабевая к ночи до 2 м/с. Временами отмечаются ветры

скоростью более 15 м/с (продолжительностью 1–2, а иногда и 3–4 дня в месяц), сопровождающиеся пыльными бурями (19–30 дней за сезон).

В марте-ноябре среднемесячная скорость ветра равна 4–5 м/с, в январе-феврале – 4–6 м/с. В годовом ходе максимум скорости ветра отмечается зимой, когда днем она обычно равна 5–6 м/с. В среднем за зиму отмечаются 3–6 дней с сильным ветром, а в отдельные годы – до 14 дней. За год число дней с сильным ветром в среднем на территории составляет 16–30, иногда 50. Ежегодно могут отмечаться штормовые ветры, скорость которых достигает 24–25 м/с. Один раз в 10 лет отмечаются скорости ветра до 40 м/с. Ветры со скоростями более 6–7 м/с вызывают зимой метели. Повторяемость направлений ветра и штилей, а также среднемесячная и годовая скорости ветра приведены в табл. 6 и 7. Повторяемость скорости ветра по градациям (в % от общего числа случаев) приведена в табл. 8.

Как следует из приведенных выше таблиц, рассматриваемый район относится к местности со слабыми ветрами. Наибольшую повторяемость имеют ветры юго-восточного, юго-западного и западного направлений и скорости ветра 4–5 м/с. Среднегодовое число дней со скоростью ветра более 8 м/с равно 144. Скорость ветра 5% – обеспеченности равна 9 м/с.

Таблица 6

Средняя повторяемость направлений ветра и штилей, %

Месяц	Направление ветра								
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	штиль
1	4	7	9	22	13	26	15	4	–
2	4	8	6	21	13	26	16	6	–
3	5	8	7	16	13	27	18	6	–
4	8	12	8	12	9	20	19	12	–
5	10	11	7	9	11	18	18	16	–
6	14	13	7	8	9	15	16	18	–
7	12	14	8	10	9	13	17	17	–
8	15	14	6	9	7	12	17	20	–
9	8	9	8	13	10	21	19	12	–
10	5	6	5	12	12	31	20	9	–
11	6	6	4	13	11	34	18	8	–
12	4	6	5	16	14	31	17	7	–
Год	8	10	7	13	11	23	17	11	–

Дополнительные метеорологические характеристики и коэффициенты, определяющие условия рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере, приведены в табл. 9. Из повторяемости направлений ветра по румбам (табл. 6) следует, что в холодный период года явно преобладают ветры с южной составляющей – юго-западные, юго-восточные и западные. Юго-западным ветрам свойственны

и наибольшие скорости ветра – 8–9 м/с (как ночью, так и днем), в то же время минимальную повторяемость имеют ветры северных, северо-восточных и восточных направлений. Средние скорости ветра по румбам колеблются в пределах от 3 до 9 м/с. В теплый период сокращается повторяемость ветров с южной составляющей и в значительной степени увеличивается повторяемость ветров с северной составляющей. Так, летом наибольшую повторяемость имеют северо-западные ветры, но также велика и повторяемость северных и северо-восточных ветров, хотя наибольшие скорости ветра наблюдаются летом при западных ветрах (от 5 до 6 м/с).

Таблица 7

Среднемесячная и годовая скорости ветра, м/с

Месяцы												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
4,8	4,8	4,8	4,9	4,9	4,4	3,8	3,7	3,9	4,8	4,9	4,6	4,5

Таблица 8

Повторяемость скорости ветра по градациям (в % от общего числа случаев)

Скорость, м/с	0–1	2–3	4–5	6–7	8–9	10–11	12–13
Повторяемость	10,9	23,6	27,5	15,6	9,0	5,2	3,9
Скорость, м/с	14–15	16–17	18–20	21–24	25–26	27–34	
Повторяемость	1,3	2,2	0,7	0,1	0,01	0,01	

Таблица 9

Дополнительные метеорологические характеристики и коэффициенты, определяющие условия рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере

Наименование характеристик	Величина
Коэффициент, зависящий от стратификации атмосферы, *A*	200
Коэффициент рельефа местности, η	1
Температура воздуха самого теплого месяца (июль), °С: – средняя – абсолютный максимум – абсолютный минимум – средняя максимальная – средняя минимальная	 21,4 41 5 27,8 14,7
Температура воздуха самого холодного месяца (январь), °С: – средняя – абсолютный максимум – абсолютный минимум – средняя максимальная – средняя минимальная	 –17,5 4 –47 –12,3 –22,6

Средние скорости ветра по румбам в летний период значительно слабее, чем зимой, и колеблются в пределах от 3,5 до 6 м/с. Таким образом, основной

особенностью в режиме ветра являются сезонная смена преобладающих направлений на противоположные и малая вероятность штилевых положений.

Вследствие отсутствия систематических комплексных метеорологических наблюдений в регионе и соответствующих статистически значимых климатических характеристик в данной работе далее приводятся обобщения для Павлодарской области (по наблюдениям на метеостанции города Павлодара).

Инверсии, наблюдаемые в регионе, можно рассмотреть в четырех позициях:

– приземные инверсии при скорости ветра менее 4 м/с;

– приземные инверсии при скорости ветра более 4 м/с;

– приподнятые инверсии с нижней границей, не превышающей 160 м над поверхностью земли;

– приподнятые инверсии с высотой нижней границы от 150 до 500 м над поверхностью земли.

Так как инверсионный слой, расположенный на расстоянии более 200 м над источником, не оказывает влияния на загрязнение атмосферы у земли, то инверсии с нижней границей выше 500 м над поверхностью земли в данной работе во внимание не принимались. Повторяемость инверсий свидетельствует о том, что в течение всего года в теплое время суток приземные инверсии явно преобладают над всеми видами состояний атмосферного воздуха, причем больше половины их отмечаются при ветрах менее 4 м/с. Повторяемость приподнятых инверсий с расположением нижней границы ниже 150 м ничтожна в течение всего года как днем, так и ночью, поэтому этот тип инверсий не рассматривался. Повторяемость приподнятых инверсий с нижней границей от 150 до 500 м – наиболее существенная в дневное время практически в течение всего года, за исключением лета, что способствует загрязнению приземного воздуха от высоких источников выброса. Днем повторяемость инверсий, за исключением зимы, резко сокращается. Летом в дневное время вероятность инверсий всех типов практически равна нулю. В остальные сезоны года днем очень резко сокращается повторяемость приземных инверсий, увеличивается повторяемость приподнятых с нижней границей выше 150 м. В зимний период днем преобладают мощные приземные инверсии как ночью, так и днем. Особенно велика мощность приземных инверсий при скорости ветра менее 4 м/с, она составляет 900–1000 м. Мощность приземных инверсий при скорости ветра более 4 м/с несколько ниже и составляет 600 м. Глубина приземных инверсий составляет более 25 на 100 м высоты, а глубина приподнятых инверсий – в половину меньше. Таким образом, зимой круглосуточно весьма значительна вертикальная устойчивость атмосферного воздуха в рассматриваемом районе. Весной мощность приземных инверсий как ночных, так и дневных, в значительной степени сокращается и составляет 400–500 м, а глубина инверсий в ночное время остается такой же, как и зимой. В дневное время глубина инверсий уменьшается в два раза. Приподнятые инверсии практически имеют мощность и глубину такую же, как и зимой. Летом в ночное время мощность инверсий всех видов не превышает 300 м, хотя глубина их остается практически такой же, как и зимой. В дневное время летом можно считать, что инверсии практически отсутствуют. Осенью мощность инверсий по сравнению с летом несколько увеличивается, равно как увеличивается и глубина инверсий.

В приземных инверсиях в течение всего года очень мал коэффициент турбулентности, который при малых скоростях ветра колеблется от 0,03 до 0,47 м^2/с, при больших скоростях – от 0,83 до 1,47 м^2/с. В приподнятых инверсиях коэффициент турбулентности несколько больше и колеблется от 0,80 до 2,25 м^2/с. Однако, во всех случаях с инверсиями приведенные значения коэффициентов турбулентности настолько малы, что в слое воздуха, занятом инверсией, можно предположить полное отсутствие вертикального воздухообмена. Коэффициент турбулентности в условиях нормального состояния атмосферы (когда температура падает с высоты на 0,65 °С на каждые 100 метров) составляет в среднем 20–40 м^2/с, что обеспечивает нормальный воздухообмен нижних слоев с верхними. Как видно из табл. 10, наличие инверсионных слоев в нижних слоях атмосферы – явление, весьма характерное для рассматриваемого региона, и с этим нельзя не считаться при оценке возможного загрязнения воздушного бассейна.

В холодный период года, когда преобладают глубокие и мощные приземные инверсии, роль высоких источников загрязнения минимальна, так как от высоких источников выбросы уносятся под действием ветрового потока выше инверсии. Из 90 зимних дней только в течение 15–14 дней, когда имеют место приподнятые инверсии с нижней границей выше 150 м, вероятно существенное влияние высоких источников выброса. В остальное время влияние их на степень загрязнения приземного воздуха весьма незначительно. В этот же период значительна роль в загрязнении воздушного бассейна низких источников выброса, включая и неорганизованные. К ним относятся АЗФ, ряд небольших промышленных объектов (с невысокими источниками выброса), частный жилой сектор, автотранспорт и прочие низкие источники. В 65 % случаев, т.е. в течение 60 дней из 90, можно ожидать значительного загрязнения, а в течение 35–37 дней за зиму и опасного, т.е. такого, когда концентрации загрязняющих веществ будут превышать ПДК. Опасное загрязнение обусловлено повторяемостью приземных инверсий и малыми скоростями ветра.

Таблица 10

Годовой ход повторяемости температурных инверсий, %
(метеостанция города Павлодара)

Месяцы / Повторяемость	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Приземных инверсий	68	62	44	38	41	42	40	41	43	39	44	61
Приподнятых инверсий	22	28	27	20	2	4	3	5	3	17	28	20

В зимнее время также существенна роль туманов, при которых увеличивается токсичность загрязняющих веществ. Однако, судя по средней продолжительности туманов в часах, влияние это кратковременно, что обусловлено значительными скоростями ветра, которые способствуют разрушению туманов. Так как зимой сложные инверсионные условия сохраняются круглые сутки, а такие источники, как автотранспорт, загрязняют, в основном, в дневное время суток, то наибольшее загрязнение воздушного бассейна зимой наблюдается в дневное время.

Весной и летом наблюдается большая повторяемость в ночное время (65–80 %) приземных инверсий при незначительных приподнятых инверсиях, кроме того, с наступлением теплого периода основная масса теплоэнергоисточников сокращает свою производительность примерно в 2 раза и, следовательно, независимо от большой повторяемости приземных инверсий летом ночью следует ожидать уменьшения загрязнения воздуха по сравнению с зимним периодом. В дневное время в переходные сезоны вероятность инверсий сокращается, а в летний – сводится практически к нулю. Однако не следует считать, что атмосфера в Павлодар-Екибастуз-Аксуском регионе в это время будет чистой. Здесь в действие вступает ряд факторов, одним из которых является скорость ветра. При отсутствии задерживающего слоя в нижней части атмосферы возникают условия, при которых в нижние слои приземного воздуха попадает максимум выбросов от высоких источников. Критерием таких условий является «опасная» скорость ветра. Для нашего случая «опасной» скоростью ветра является скорость 5–7 м/с, повторяемость ее в дневное время летом составляет 25–26 %. Кроме того, летом увеличивается вероятность пыльных бурь, которые вносят эффект естественного природного загрязнения атмосферного воздуха, частота их в среднем составляет 4 дня в месяц. Таким образом, летний период оказывается весьма неблагоприятным в смысле сохранения чистоты атмосферного воздуха.

Немалую роль в самоочищении атмосферного воздуха играют процессы термической конвекции, в результате которых происходит обмен воздуха между верхними и нижними слоями, причем до больших высот, порядка нескольких километров. Отсюда и весьма существенное разбавление концентраций загрязнения, но развитию этого процесса существенно мешают повышенные скорости ветра. В то же время, повышение скорости ветра играет важную роль в разбавлении загрязнений, особенно при наличии инверсий. Инверсии при ослабленных скоростях ветра (особенно при штиле) приводят к застойным явлениям и создают потенциальные возможности для накопления вредных веществ в приземном слое атмосферы.

Для характеристики устойчивости нижнего 2–3-х километрового слоя служит высота слоя перемешивания (ВСП). В этом случае наблюдаются наиболее интенсивные вертикальные движения, при этом вертикальный градиент температуры в нем приближается к сухоадиабатическому или превышает его, а высота распространения слоя перемешивания отмечается на тех высотах, где неустойчивая или равновесная стратификация сменяется устойчивой. Высота слоя перемешивания рассчитывалась для Павлодарского региона за период 1979–1989 гг. по ежедневным данным радиозондирования атмосферы и максимуму температуры воздуха за сутки. Минимальные значения ВСП наблюдаются в январе и декабре (0,41–0,43 км), а максимальные отмечаются в летнее время и достигают 2,25 км (май) и 2,49 км (июнь). Резкое возрастание ВСП в летнее время обусловлено ростом термической неоднородности от зимы к лету. Коэффициент вариации ВСП изменяется в пределах 0,3–0,5 и лишь в зимние месяцы коэффициент достигает величин 0,7–0,8. Большие значения коэффициента вариации в зимнее время указывают на то, что минимальная высота перемешивания может быть намного меньше ее средней величины, что связано с большой повторяемостью приземных и приподнятых инверсий зимой (68 и 22 %, соответственно), которые влияют на формирование слоя перемешивания и его высоту.

В целом совокупность метеорологических условий, влияющих на способность атмосферы рассеивать загрязняющие вещества и формировать уровень загрязнения в приземном слое, определяется потенциалом загрязнения атмосферы (ПЗА). Метеорологические условия, приводящие к накоплению загрязняющих веществ, относят к высокому потенциалу, и, наоборот, условия, благоприятные для их рассеивания, определяют как низкий потенциал загрязнения. Важной особенностью ПЗА является различие его значений для разных типов источников, поскольку различное сочетание метеорологических условий приводит к накоплению примесей от низких и высоких труб, «холодных» и «горячих» выбросов. В среднем за год наблюдаются сравнительно благоприятные условия для рассеивания вредных выбросов от низких источников. Повторяемость скоростей ветра меньше 1 м/с в среднем за год здесь не превышает 11 %, приземных инверсий в целом за год – 38 %. В связи с климатическими особенностям этого района в разные периоды года создаются примерно одинаковые условия как для рассеивания, так и для накопления примесей в приземном слое воздуха. Повышенный уровень загрязнения воздуха в этом районе может отмечаться летом и зимой. Увеличение в зимний период мощности и интенсивности инверсий и частоты туманов может создавать зимний максимум загрязнения воздуха. В соответствии с районированием, выполненным КазНИГМИ, большая часть Павлодарской области, включая рассматриваемый регион, относится к зоне низкого потенциала загрязнения (ПЗА = 2,6).

1.1.2. Орографическое описание промышленных регионов

Карачаганакское нефтегазоконденсатное месторождение расположено на территории Бурлинского района Уральской области, на южных отрогах Общего Сырта и Подуральского плато, в глинистых степях с абсолютными отметками в 60–100 м. Рельеф территории увалисто-холмистый.

Окружающая местность представляет собой долину р. Утвы (приток р. Урал), ширина которой в этом районе составляет 30–35 км. С востока и запада в 32 км протекает р. Урал. Кроме этих рек гидрографическая сеть представлена здесь рядом временных водостоков и значительным количеством бессточных озер. Грунтовые воды располагаются на глубине 5–6 м, но встречаются места, где грунтовые воды выходят на глубину 1 м. Рассматриваемая территория находится в зоне умеренно засушливых теплых степей на темно-каштановых почвах, местами с солонцами. Растительность ковыльно-типчаковая (преобладает ковыль, полынь, житняк и др.). Наиболее богатой растительностью отличаются поймы рек, где развиты разностно-злаковые луга.

1.2. Статистические показатели по источникам загрязнения атмосферы технополиса и их анализ

1.2.1. Параметры и характеристики источников выбросов вредных примесей Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения (КНГКМ)

Расчеты проводятся для ограниченной части Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения (КНГКМ) с горизонтальными размерами порядка 50×50 км. Эта область выбрана таким образом, чтобы контур месторождения

был внутри нее и включал близлежащие населенные пункты. С целью удобства анализа наиболее многочисленная группа источников выбросов – подогреватели скважин – разбиты на два множества по 40 элементов в каждом.

Параметры и характеристики источников выбросов вредных примесей в районе газоконденсатного месторождения и их местоположение введены в базу данных компьютера с целью удобства анализа автоматизации и ее обработки. Все источники выбросов распределены на 9 типов: факел высокого давления (ФВД) – 3 источника, факел низкого давления (ФНД) – 4 источника, установки регенерации – 5 источников, агрегаты газоперекачки – 9 источников, установки термического обезвреживания – 3 источника, подогреватели газа – 5 источников, агрегаты УКПС-16 – 9 источников, подогреватели теплоносителей – 19 источников и подогреватели скважин – 80 источников. Предварительный анализ показал, что основной вклад в суммарное загрязнение будет давать четыре типа источников, перечисленных далее в порядке значимости: агрегаты УКСП-16, установки термического обезвреживания, подогреватели газа и установки регенерации. Эти источники выбросов были далее объединены в более крупные с учетом их близкого геометрического местоположения друг относительно друга. Окончательно было определено 9 основных источников выбросов вредных веществ в районе КНГКМ, параметры которых приведены в табл. 11.

Таблица 11

Параметры выбросов основных источников КНГКМ

Тип источника	№ п/п	Высота выброса	Диаметр трубы	Скорость выброса	SO объем выброса	NO объем выброса	*T* выброса	*X*	*Y*
Установка регенерации	1 2	12,95 –	45 –	2,27 –	0015 0010	0033 0022	450 –	14000 16800	4600 8990
Установка термичес. обезвр.	1	23	1	2	091	02	350	13075	5600
УКСП-16	1 2 3	13 – –	4,8 – –	10,4 – –	021 – –	10,38 16,38 16,38	380 – –	8525 16675 13875	4975 9475 5385
Подогреватель газа	1 2 3	10,9 – –	45 – –	7,7 – –	0036 – –	0086 – 0043	350 – –	8500 16730 13700	4725 9480 –

В соответствии с утвержденной «Технологической сметой разработки Карачаганакского месторождения в режиме Сайклинг-процесса на период 1991–2005 гг.» добыча продукции месторождения должна возрасти к 2005 году (табл. 12):

– добыча газа – до 26,3 млрд. м^3/год;

– добыча жидких углеводородов – до 13 млн т/год, в том числе нефти 2,5 млн т/год, газового конденсата 10,5 млн т/год .

Для обеспечения запланированной на уровне 2005 года добычи газа, конденсата и нефти дополнительно к объектам, предусмотренным проектом обустройства месторождения на объем добычи газа 11 млрд. м^3 в год, намечается строительство промысловых объектов.

Таблица 12

Объем обратной закачки сухого газа для осуществления Сайклинг-процесса (к 2005 г. возрастает до 32,6 млрд. м^3/ год) с учетом бурения оценочных, разгрузочных и нефтяных скважин

Годы	Добыча жидких углеводородов, млн т		Добыча газа сепарации, млрд м^3	Объем закачки газа, млрд м^3	Общее количество скважин		
					всего	в том числе	
	всего	в т.ч. нефтяные				нагнетательные	нефтяные
1991	9,1	2,0	10,6	4,2	169	23	25
1992	9,2	2,0	11,0	9,6	205	60	30
1993	10,8	2,2	13,1	12,2	240	72	35
1994	12,4	2,35	15,3	18,7	293	104	40
1995	13,0	2,5	16,6	20,0	314	109	45
1996	13,0	2,5	16,6	21,0	335	118	50
1997	13,0	2,5	16,7	21,8	360	122	55
1998	13,0	2,5	17,3	22,8	380	124	60
1999	13,0	2,5	17,8	23,3	400	129	65
2000	13,0	2,5	19,5	24,6	425	132	70
2001	13,0	2,5	20,3	26,0	450	135	75
2002	13,0	2,35	22,0	27,3	475	141	80
2003	13,0	2,15	23,6	29,0	500	149	85
2004	13,0	1,9	24,9	31,2	525	154	87
2005	13,0	1,7	26,3	32,6	540	164	90

Баланс добычи сырья КНГКМ и мощностей по его переработке приведен в табл. 13. Из таблицы видно, что в 1998 году введены в эксплуатацию объекты по переработке газов сепарации на Уральском ГПЗ с целью доведения его производительности к 2005 году до 10 млрд м^3 в год.

Таблица 13

Баланс добычи сырья КНГКМ и мощностей по его переработке на Оренбургском ГПЗ

Годы	Баланс по жидким углеводородам, млн т			Баланс по газам стабилизации, млрд м^3		
	объем добычи	мощности ОГПЗ	мощности ОГПЗ	объем добычи	мощности ОГПЗ	мощности ОГПЗ
1	2	3	4	5	6	7
1991	9,1	9,3	–	10,6	11,0	–
1992	9,2	9,3	–	11,0	11,0	–
1993	10,8	12,3	–	13,1	17,0	–

Окончание табл. 13

1	2	3	4	5	6	7
1994	12,4	15,0	–	15,3	17,0	–
1995	13,0	15,0	–	16,6	17,0	–
1996	13,0	15,0	–	16,6	17,0	–
1997	13,0	15,0	–	16,7	17,0	–
1998	13,0	15,0	–	17,3	17,0	0,3
1999	13,0	15,0	–	17,8	17,0	0,8
2000	13,0	15,0	–	19,5	17,0	2,5
2001	13,0	15,0	–	20,3	17,0	3,3
2002	13,0	15,0	–	22,0	17,0	5,0
2003	13,0	15,0	–	23,6	17,0	6,6
2004	13,0	15,0	–	24,9	17,0	7,96
2005	13,0	15,0	–	26,3	17,0	9,3

1.2.2. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников

Главным источником угроз окружающей среде в Павлодарской области являются тепловые электрические станции, использующие технологию сжигания высокозольных Экибастузских углей в камерных топках котлоагрегатов с твердым золоудалением. Для существующих сегодня на ТЭС котлоагрегатов, в топках которых сжигается в факеле пылеугольное топливо, около 10 % всей золы выпадает в холодную воронку и через систему золоудаления отправляется в золоотвал. Остальная часть золы (примерно 90 %) транспортируется дымовыми газами (продуктами сгорания) через испарительные и конвективные поверхности нагрева, подвергая их абразивному износу. Высокая концентрация золы в дымовых газах на входе в электрофильтры снижает их КПД, что приводит к повышенным выбросам золы из дымовой трубы.

В 2001 году в атмосферу области выброшено загрязняющих веществ (табл. 14) (в тыс. тонн): всего – 469,3; из них твердых – 208,5; окислов углерода – 23,1; сернистого ангидрида – 172,8; углеводородов – 6,6; окислов азота – 57,4; прочих – 0,9.

Таблица 14

Динамика выбросов ЗВ в атмосферу от стационарных источников, тыс. т

Год	1997	1998	1999	2000	2001
Всего по области	514,0	445,2	426,1	461,2	469,3
г. Павлодар	150,4	143,9	138,2	130,4	114,1
г. Екибастуз	170,7	136,1	111,3	159,7	183,7
г. Аксу	188,6	161,2	160,2	168,7	169,4
Другие районы	4,3	4,0	16,4	2,4	2,1

В табл. 15 и 16 приведены динамика изменения количественных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу по городам Павлодарской области и по области в целом за 1997–2001 гг. и динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от основных предприятий-загрязнителей.

Таблица 15

Динамика изменения количественных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу по городам Павлодарской области и Павлодарской области в целом за 1997–2001 гг. (тыс. т)

Год	Города, область	Всего, в том числе	Твердые	Сернистый ангидрид	Окись углерода	Оксиды азота	Прочие
1997	г. Павлодар	150,674	59,836	59,177	5,063	20,811	5,787
	г. Екибастуз	170,601	74,162	62,956	9,826	23,424	0,233
	г. Аксу	188,507	91,427	62,531	18,435	16,083	0,032
	Область	**515,227**	**228,028**	**185,505**	**34,607**	**60,942**	**6,145**
1998	г. Павлодар	143,214	60,286	52,491	4,760	20,526	5,151
	г. Екибастуз	136,077	61,411	48,915	7,905	17,572	0,274
	г. Аксу	161,297	80,097	50,455	15,733	14,974	0,038
	Область	**445,337**	**204,292**	**152,491**	**29,587**	**53,452**	**5,516**
1999	г. Павлодар	135,397	57,861	49,541	4,208	20,445	3,342
	г. Екибастуз	109,075	44,796	43,044	7,086	14,012	0,136
	г. Аксу	159,728	76,767	53,814	16,095	13,024	0,03
	Область	**408,307**	**181,516**	**147,091**	**28,306**	**47,843**	**3,551**
2000	г. Павлодар	130,4	50,946	49,541	4,362	17,782	7,791
	г. Екибастуз	159,68	66,318	59,03	11,93	22,238	0,165
	г. Аксу	168,665	85,67	61,729	5,932	15,294	0,04
	Область	**461,196**	**204,07**	**170,822**	**22,837**	**55,464**	**8,003**
2001	г. Павлодар	114,128	44,91	41,024	4,246	16,637	7,213
	г. Екибастуз	183,741	77,887	68,597	12,142	24,927	0,189
	г. Аксу	169,366	84,794	62,815	6,116	15,604	0,037
	Область	**469,309**	**208,482**	**172,778**	**23,127**	**57,436**	**7,485**

Таблица 16

Динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферу
от основных предприятий-загрязнителей (тыс. т/год)

ПАЗ					
	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
1	2	3	4	5	6
Диоксид серы	4,04	4,107	2,947	2,964	2,87
Окислы углерода	0,063	0,068	0,065	0,066	0,102
Окислы азота	0,031	2,602	2,759	2,55	2,488
Твердые частицы	11,285	11,113	10,061	9,912	9,248
Углеводороды		0,036	0,033	0,035	0,036
Аммиак		0,0015	0,0015	0,0015	0,012
Всего	18,195	17,931	15,867	15,64	14,847
ТЭЦ					
	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
Диоксид серы	31,651	26,489	27,732	27,24	24,845
Окислы углерода	1,276	1,274	1,497	1,447	1,409
Окислы азота	0,001	9,821	10,109	9,963	9,578
Твердые частицы	23,173	23,887	24,316	21,894	19,398
Углеводороды		0,0014	0,0014	0,0014	0,0014
Всего	65,338	61,476	63,657	60,595	55,231
АЗФ – филиал ОАО «ТНК “Казхром”»					
	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
диоксид серы	3,891	3,733	3,963	4,081	4,073
окислы углерода	2,203	2,087	2,445	2,628	2,719
окислы азота		1,29	1,306	1,065	1,03
сероводород		0,014	0,018	0,022	0,019
твердые частицы	21,55	20,506	20,356	16,788	14,06
углеводороды				0,00495	0,0052
Всего	28,981	27,617	28,091	24,594	21,912
ЗАО «ПНХЗ»					
	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
Диоксид серы	1,811	2,505	1,018	1,296	1,635
Окислы углерода	0,179	0,408	0,168	0,306	0,468
Окислы азота	0,243	0,774	0,215	0,234	0,357

Продолжение табл. 16

1	2	3	4	5	6
Твердые частицы	0,065	0,116	0,065	0,051	0,052
Углеводороды	5,013	4,316	3	7,052	6,481
Всего	7,714	8,119	4,777	9,523	9,544

ОАО «Евроазиатская энергетическая корпорация»

	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
Диоксид серы	58,428	46,691	49,834	57,622	58,705
Окислы углерода	16,182	13,607	13,606	3,235	3,313
Окислы азота		13,695	11,714	14,224	12,486
Твердые частицы	68,697	58,189	55,363	68,766	70,458
Углеводороды		0,013	0,008	0,008	0,0074
Всего	158,069	132,195	130,52	143,855	147,048

ТОО «АЕС Экбастуз»

	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
Диоксид серы	20,977	16,965	12,58	17,43	26,948
Окислы углерода	0,039	0,03	0,819	1,262	1,943
Окислы азота	0,002	1,608	5,754	8,799	13,823
Твердые частицы	21,983	17,481	12,579	20,639	32,644
Углеводороды		0,00177	0,0017	0,0025	0,00211
Всего	52,884	42,466	32,148	48,135	75,359

ЗАО «Екибастузский энергоцентр»

	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
Диоксид серы	32,627	24,104	22,819	34,308	35,249
Окислы углерода	1,669	1,42	1,141	1,745	1,685
Окислы азота	0,008	7,387	6,214	11,493	9,314
Твердые частицы	40,994	34,161	21,998	34,911	34,096
Углеводороды		0,0076	0,0041	0,00021	0,00122
Всего	85,738	68,275	52,176	82,461	80,346

ТОО «Эибастузская ТЭЦ»

	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
Диоксид серы	7,941	6,812	6,748	6,324	5,399
Окислы углерода	0,039	0,03	0,029	0,029	0,028
Окислы азота	0,002	1,608	1,677	1,543	1,344
Твердые частицы	6,659	4,671	5,183	4,844	4,479

Продолжение табл. 16

1	2	3	4	5	6
Углеводороды			0,000651	0,000648	0,000648
Всего	16,498	13,125	13,64	12,741	11,25

ТОО «ТЭЦ-2»

	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
Диоксид серы	4,69	5,493	2,14	5,438	2,104
Окислы углерода	0,355	0,33	0,149	0,26	0,209
Окислы азота		3,144	0,769	1,366	1,109
Твердые частицы	8,562	8,097	3,982	6,11	5,382
Углеводороды				0,00169	0,00111
Всего	15,986	17,064	7,041	13,176	8,806

ТОО «Энергетическая компания Павлодарская ТЭЦ-3»

	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
Диоксид серы	15,973	13,024	13,355	10,225	8,887
Окислы углерода	1,192	0,005	0,842	0,535	0,531
Окислы азота	0,005	5,034	5,261	2,915	3,054
Твердые частицы	14,275	15,481	14,196	9,307	9,485
Углеводороды			0,0004	0,003	0,0036
Всего	37,375	34,669	34,019	22,385	21,96

Разрез «Восточный» ОАО «ЕЭК»

	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
Диоксид серы	0,548	0,516	0,502	0,514	0,516
Окислы углерода	0,456	0,433	0,367	0,41	0,428
Окислы азота	0,014	0,196	0,172	0,184	0,196
Твердые частицы	1,828	2,354	2,032	2,346	2,508
Углеводороды	0,548	0,026	0,022	0,026	0,032
Всего	3,261	3,525	3,096	3,479	3,68

Разрез «Богатырь» ТОО «БАК»

	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
Диоксид серы	0,55	0,234	0,204	0,254	0,215
Окислы углерода	3,979	2,133	1,543	4,52	3,972
Окислы азота	0,032	0,104	0,102	0,123	0,108
Твердые частицы	1,515	1,31	1,5	1,634	1,677
Углеводороды	0	0,031	0,032	0,043	0,041
Всего	7,559	3,819	3,387	6,53	6,023

Окончание табл. 16

1	2	3	4	5	6
Разрез «Северный» ТОО «БАК»					
	1997 г.	1998 г.	1999 г.	2000 г.	2001 г.
Диоксид серы	0,085	0,113	0,083	0,107	0,118
Окислы углерода	1,725	2,498	2,52	3,82	3,888
Окислы азота	0,036	0,087	0,054	0,073	0,079
Твердые частицы	0,808	1,206	0,871	1,751	2,047
Углеводороды	0	0,077	0,021	0,037	0,0039
Всего	2,729	3,981	3,555	5,798	6,182

Приведем также качественный состав выбросов основных загрязняющих веществ (табл. 17) и выбросы загрязняющих веществ в атмосферу по ингредиентам за 2001 г. (табл. 18) в Павлодарской области.

Таблица 17

Качественный состав выбросов основных ЗВ за 2001 г. (тыс. т)

Наименование вещества	Класс опасности	Масса выбросов
Твердые вещества	3	208,5
Серы диоксид	3	172,8
Окись углерода	4	23,1
Окислы азота	2	57,4
Прочие		7,5
Итого		469,3

Таблица 18

Выбросы ЗВ в атмосферу по ингредиентам за 2001 г. (тыс. т)

	Твердые	Окислы серы	Окислы углерода	Окислы азота	Углево-дороды	Прочие	Всего
г. Павлодар	44,91	41,02	4,24	16,74	6,4	0,81	114,13
г. Экибастуз	77,89	68,6	12,14	24,93	0,14	0,04	183,74
г. Аксу	84,79	62,82	6,12	15,6	0,01	0,02	169,37
Районы							
Всего по области	208,48	172,78	23,13	57,44	6,56	0,93	469,31

1.2.3. Загрязнение атмосферы передвижными источниками

Несмотря на снижение за последние годы объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников, улучшения состояния атмосферного воздуха в области не произошло, т.к. загрязнение воздуха усилилось

из-за выбросов от автомобильного автотранспорта (табл. 19). Производственный контроль на автотранспортных предприятиях ослаблен ввиду недостаточного количества средств контроля (газоанализаторов, дымомеров), особенно в районах. Имеющиеся приборы контроля несвоевременно проходят государственную поверку в органах Госстандарта, часть из них неисправна, предприятия автосервиса зачастую не выполняют своих функций. В результате от 20 до 40 % парка автомобилей эксплуатируются с превышением норм токсичности и дымности. Однако и это не отражает реальной картины загрязнения атмосферного воздуха. В последнее время многие предприятия области зачастую сдают свой автомобильный парк в аренду, создаются все новые товарищества, малые предприятия – индивидуальные перевозчики, отчетности для таких предприятий не существует. В области ДГП «Казгидромет», ввиду слабой материально-технической базы, не определяет фон углеводородов. Влияние автозаправочных станций на окружающую среду также проследить невозможно. В г. Аксу стационарный пост ДГП «Казгидромет» вообще отсутствует.

Таблица 19

Динамика выбросов ЗВ от передвижных источников (тыс. т)

	1997		**1998**		**1999**		**2000**	**2001**
Область	22,543		19,501		14,029		16,054	32,823
г. Павлодар	13,978		9,783		7,205		8,588	22,777
г. Екибастуз	6,074		6,777		4,558		5,090	6,486
г. Аксу	1,150		1,506		1,008		1,437	1,807
	1997				**1998**			
Ингредиенты	Область	Павлодар	Екибастуз	Аксу	область	Павлодар	Екибастуз	Аксу
Всего, в т.ч.	22,543	13,978	6,074	1,150	19,501	9,783	6,777	1,506
Окись углерода	15,172	9,145	4,237	0,861	12,61	6,352	4,182	1,038
Углеводороды	2,948	1,912	0,771	0,125	2,474	1,237	0,895	0,18
Альдегиды	0,314	0,214	0,079	0,01	0,297	0,149	0,115	0,018
Сажа	0,098	0,06	0,028	0,004	0,11	0,054	0,042	0,008
Окись азота	3,299	2,18	0,781	0,123	2,877	1,579	1,215	0,21
Диоксид серы	0,712	0,466	0,177	0,026	0,823	0,412	0,328	0,051
	1999				**2000**			
Ингредиенты	Область	Павлодар	Екибастуз	Аксу	область	Павлодар	Екибастуз	Аксу
Всего, в т.ч.	14,029	7,205	4,558	1,008	16,054	8,588	5,090	1,437
Окись углерода	8,961	4,642	2,751	0,762	10,074	5,554	2,938	0,976
Углеводороды	1,8	0,917	0,613	0,102	2,091	1,090	0,707	0,174
Альдегиды	0,218	0,11	0,081	0,006	0,262	0,129	0,099	0,019
Сажа	0,081	0,041	0,029	0,003	0,096	0,048	0,035	0,007
Окись азота	2,348	1,184	0,85	0,088	2,786	1,399	1,023	0,208
Диоксид серы	0,62	0,31	0,233	0,046	0,745	0,366	0,286	0,052

Суммарные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу области за 2001 год приведены в табл. 20.

Таблица 20

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу области за 2001 г., тыс. т

Ингредиенты	Область	Павлодар	Екибастуз	Аксу
Всего, в т.ч.	32,823	22,777	6,486	1,809
Окись углерода	24,976	18,672	3,949	1,232
Углеводороды	3,511	2,207	0,866	0,219
Альдегиды	0,254	0,091	0,114	0,023
Сажа	0,12	0,056	0,041	0,009
Бенз(а)пирен	0	0	0	0
Окись азота	3,298	1,549	1,192	0,26
Диоксид серы	0,664	0,202	0,325	0,065
Соединения свинца	0	0	0	0

1.3. Статистические показатели загрязнения атмосферы по классам вредных веществ и их анализ

1.3.1. Годовые и месячные показатели загрязнения

Для изучения зависимости загрязнения залповыми выбросами от метеорологических условий в районе Карачаганакского месторождения газа «Крачаганак Газпром» представил нам материал по отдельным дням за январь-ноябрь 1989 г. для станций Карачаганак, Березовка, Жарсуат, Тунгуш, Жанаталап.

Суммарный объем залповых выбросов по месяцам (осредненный для 5 выбранных станций) и их отклонения даны в табл. 21. Метеорологические элементы – средние месячные значения давления, температура воздуха и скорость ветра, а также их максимум и минимум помещены в табл. 22. Из табл. 21 следует, что общий объем выброса (сумма выброса за месяц, подсчитанная по суточным данным) в среднем за год составил 6374,3; максимальный – 13835,8 (апрель), а минимальный – 1653,1 тыс. м^3 (январь). Средний объем выброса за сутки из 11 рассматриваемых месяцев, определенный из средних месячных значений, составил 228,2. При этом максимум – 461,2 (апрель), минимум – 57,0 тыс. м^3 (январь). Проследим эти величины по суткам каждого месяца. Максимальный объем выбросов за сутки наблюдался в марте и составил 1216,2 тыс. м^3. Самый малый из суточных выбросов был 2617 тыс. м^3 (сентябрь). В среднем за 11 месяцев эта величина составила 627,0. Из минимальных суточных выбросов самый малый был в феврале и августе и равнялся 0,01 тыс. м^3. Самый большой из минимумов за сутки составил 7,25 тыс. м^3 (апрель). Средний минимальный выброс был 0,76 тыс. м^3. Среднее квадратическое отклонение (σ), характеризующее суточное изменение выброса от нормы, за рассматриваемый период имело максимум 288,0 (март), минимум – 72,2 (сентябрь), а в среднем составило 181 тыс. м^3.

Таблица 21

Объем залповых выбросов (тыс. м^3)
в районе Карачаганакского месторождения газа (январь – ноябрь 1989 г.)

Месяц	Число случаев	Общий объем	Ср.сут. объем	Сут.макс. объем	Сут.мин. объем	σ
1	29	1653,1	57,0	405,0	0,02	76,3
2	28	5523,6	197,3	872,0	0,01	260,3
3	31	8367,3	269,9	1216,2	0,12	288,0
4	30	13835,8	461,2	881,6	7,25	248,0
5	31	10476,9	338,0	623,2	0,46	208,0
6	30	9312,5	310,4	802,1	0,06	243,0
7	21	6039,4	287,6	542,7	0,05	182,8
8	22	4884,6	222,0	479,0	0,01	182,4
9	18	1674,9	93,0	261,0	0,08	72,2
10	31	3955,6	127,6	342,1	0,06	100,1
11	30	4393,8	146,4	472,0	0,25	130,5
Ср. сут.		6374,3	228,2	627,0	0,76	181,1
Макс.		13835,8	461,2	1216,2	7,25	288
Мин.		1653,1	57,0	261,0	0,01	72,2

В табл. 22 представлены статистические характеристики метеорологических элементов при залповых выбросах (давление, температура воздуха и скорость ветра) по отдельным месяцам и за 11 месяцев осредненные по пяти станциям. Так, давление в среднем за имеющийся у нас период наблюдений (11 месяцев) составило 757 при максимуме 761 (март, апрель, ноябрь) и минимуме 752 гПА (июль). Из выборок максимальных и минимальных величин видно, что абсолютный максимум давления 774 наблюдался в феврале, а абсолютный минимум 741 гПА в мае. Так, давление в среднем за имеющийся у нас период наблюдений (11 месяцев) составило 757 при максимуме 761 (март, апрель, ноябрь) и минимуме 752 гПА (июль). Из выборок максимальных и минимальных величин видно, что абсолютный максимум давления 774 наблюдался в феврале, а абсолютный минимум 741 гПА в мае.

Средняя месячная температура воздуха колебалась от −10,8 °С (в январе) до 24,1 °С (в июле), а в среднем она составила 8,1 °С. При этом абсолютный максимум был 27,4 °С (июнь, июль), а абсолютный минимум −25,2 °С (январь).

Средняя скорость ветра за год составила 4,2; максимум 5,0 (октябрь), а минимум 3,1 м/с (июль). Однако в отдельные дни сила ветра была более 10 м/с: максимальная суточная величина в январе 11,0, в марте 10,8, в апреле 13,2, в мае 10,0 и в октябре 14,0 м/с.

Определенный интерес представляет рассмотрение изменчивости количества выбросов, давления и температуры воздуха, а также скорости и направления ветра по суткам отдельных месяцев.

Таблица 22

Статистические характеристики метеорологических элементов при залповых выбросах (январь – ноябрь 1989 г.)

Наименование	I	II	III	IV	V	VI	VII
Давление воздуха (гПА)							
Среднее	754	760	761	761	754	755	752
Абс. мак	763	774	773	771	765	763	758
Абс. мин	743	742	747	747	741	748	746
Температура воздуха (°С)							
Средняя	–10,8	–9,4	–3,6	6,9	14,9	23,2	24,4
Абс. мак	–1,6	0,0	1,9	14,5	20,0	27,4	27,4
Абс. мин	–25,2	–24,1	–9,1	–4,2	7,0	19,7	19,2
Скорость ветра (м/с)							
Средняя	4,9	4,9	4,1	4,6	4,5	3,2	3,1
Абс. мак	11,0	9,6	10,8	13,2	10,0	8,0	5,4
Абс. мин	1,3	0,4	0,3	0,7	1,2	1,0	3,0
Давление воздуха (гПА)							
Среднее	754	758	758	761	757	761	752
Абс. мак	762	764	766	773	767	774	758
Абс. мин	747	746	748	751	746	751	741
Температура воздуха (°С)							
Средняя	23,0	16,7	7,6	–3,7	8,1	24,1	–10,8
Абс. мак	27,0	25,0	16,0	2,2	14,5	27,4	–1,6
Абс. мин	15,0	9,0	1,0	–19,0	1,0	19,7	–25,2
Скорость ветра (м/с)							
Средняя	4,3	4,6	5,0	3,3	4,2	5,0	3,1
Абс. мак	7,0	7,4	14,0	8,5	9,5	14,0	5,4
Абс. мин	3,0	2,0	2,0	0,1	1,2	3,0	0,1

ЯНВАРЬ. Максимальный объем выбросов наблюдался 31 января и составил 405034 м, при этом минимум выбросов –24 м^3 (3 января). Амплитуда выброса равна 405010 м^3 при $\sigma = 76{,}3$ тыс. м^3. Максимуму выброса соответствовало максимальное атмосферное давление воздуха –763,0 гПА при температуре воздуха –8,0 °С и северо-восточном и восточном ветре силой 4,0 м/с. При самом слабом выбросе за месяц наблюдалось: давление 755,9 гПА, температура воздуха –25,0 °С и западный и южный ветры силой 5,0 м/с.

ФЕВРАЛЬ. В этом месяце максимум выбросов наблюдался 1 февраля, т.е. сразу после максимума выбросов за январь, и составил 872024 м^3 при атмосферном

давлении 742,0 гПА, температуре воздуха –4,5 °С и юго-западном и западно-юго-западном ветрах силой 5,3 м/с. Минимальное количество выбросов было 10 м^3 5 февраля, когда давление равнялось 755,9 гПА, температура воздуха была –3,0 °С, а ветер западно-северо-западный при 5,3 м/с. Амплитуда суточных выбросов составила 872014 м^3 при σ = 260,3 тыс. м^3.

МАРТ характеризуется очень большой величиной максимального выброса 1216195 м^3, который произошел 20 марта при наблюдавшихся метеоусловиях: атмосферном давлении 757,0 гПА, температуре воздуха –1,4 °С и западном ветре 3,5 м/с. Минимальное количество выброса относится к 3 марта и равно 124 м^3 при атмосферном давлении 769,7 гПА, температуре воздуха –9,1 °С (что соответствует минимуму за данный месяц) и восточном и юго-восточном ветрах 7,8 м/с. Амплитуда выброса составила 1216071 м^3 при σ = 288 тыс. м^3.

АПРЕЛЬ – месяц с максимумом выброса 881573 м^3, отмеченным 19 апреля. Давление было 769,0 гПА, температура воздуха 12,1 °С при восточном и юго-восточном направлениях ветра в 4,8 м/с. Минимальное количество выбросов по сравнению с тремя предыдущими месяцами большое 7251 м^3 (2 апреля). Давление воздуха было 754,2 гПА, температура 4,5 °С и юго-западный ветер в 4,5 м/с. Амплитуда колебаний объема выбросов равна 874322 м^3 при σ = 248 тыс. м^3.

МАЙ. В этом месяце максимальный объем выбросов составил 623224 м^3 19 мая при минимуме 458 м^3 28 мая. Амплитуда колебаний выбросов составила 622766 м при σ = 208 тыс. м^3. При этом 19 мая наблюдались: $t°$ = 15,5 °С, P = 751,5 гПА и ветер юго-западный силой 1,3 м/с, а 28 мая – $t°$ = 12,8 °С, P = 762,3 гПА, ветер северный и восточный силой 4,3 м/с.

ИЮНЬ. Максимум выбросов пришелся на 28 июня и был равен 802144 м^3. В этот день температура воздуха составила 20,3 °С при давлении 749,0 гПА и северо-восточном ветре в 2,0 м/с. Минимум выбросов в 60 м^3 наблюдался 21 июня при температуре воздуха 24,6 °С, давлении 755,5 гПА и ветре силой 3,0 м/с восточного и юго-восточного направлений. Амплитуда колебаний выбросов за месяц равна 802084 м^3 при σ = 243 тыс. м^3.

ИЮЛЬ. Наибольшее количество выбросов (542656 м^3) отмечалось 17, а наименьшее (54 м^3) 31 июля, т.о. амплитуда выброса составила 542602 м^3, а дисперсия – 182,8 м^3. Давление воздуха 17 июля было равно 750,0 гПА, температура 27,2 °С, ветер юго-восточный со скоростью 4,6 м/с. При минимальном выбросе 3 июля давление упало до 747,0 гПА, температура воздуха была 25,0 °С, ветер юго-западный, а скорость 5,0 м/с.

АВГУСТ. В этом месяце максимальный выброс наблюдался 10 августа и составил 479039 м^3, минимальный только 10 м^3 (24 августа), амплитуда выброса равна 479029 м^3, сигма 182,4. Давление воздуха 10 августа поднималось до 761,0 гПА, температура воздуха до 24,0 °С, ветер был юго-восточный силой 4,2 м/с. При слабом выбросе 24 августа понизились давление (754 гПА) и температура воздуха (20,0 °С). Ветры в этот день отмечались юго, юго-западного направлений, а сила их доходила до 7,0 м/с.

СЕНТЯБРЬ. Выброс в сентябре колебался от 84 м^3 (17 сентября) до 261024 м^3 (1 сентября). Значительно уменьшилась по сравнению с другими месяцами амплитуда выброса (260940 м^3) и σ = 72,2. При минимальном выбросе 17 сентября

давление воздуха было 758,0 гПА, температура 18,0 °С, ветер северо-западный со скоростью 3,4 м/с. При максимальном выбросе 1 сентября давление составило 761,0 гПА, температура воздуха 24,0°С, ветер северо-восточный, а скорость его была 4,5 м/с.

ОКТЯБРЬ характеризовался большой амплитудой (342068 м^3), максимальный выброс отмечался 30 октября (432124 м^3), а минимальный 16 октября (56 м^3). Давление воздуха при максимальном выбросе (30 октября) составило 763,0 гПА, температура воздуха 2,0 °С, ветер был северо-западный со скоростью 4,5 м/с. При минимальном выбросе, который отмечался 16 октября, давление воздуха было высоким 764,0 гПА, температура 12,0 °С, ветер преобладал юго-западного направления, а скорость его составила 2,3 м/с.

НОЯБРЬ. Количество выброса в ноябре от октября еще больше возросло (472044 м^3). В это время (18 ноября) давление было 759,9 гПА, температура воздуха 1,3 °С. Ветер был юго-восточный, а скорость его 3,6 м/с. Минимальный выброс составил 246 м^3 (7 ноября). Температура воздуха понизилась до –3,6 °С. Ветер северо-восточный очень слабый (0,3 м/с).

Анализ имеющегося материала показал, что существует некоторая сезонность в колебании загрязнения. Так, в период март-июнь она несколько увеличивается, а с июля по февраль уменьшается. Кроме того, имеется большая изменчивость в суточных выбросах загрязнения. На эту особенность выбросов загрязнения необходимо обратить серьезное внимание.

1.3.2. Сезонные колебания загрязнения

Располагая данными об объеме залповых выбросов по отдельным месяцам, была поставлена задача – рассмотреть колебания этого явления по сезонам. На основании табл. 21 был исследован ход объема залповых выбросов (тыс. м^3) в районе Карачаганакского месторождения газа за январь-ноябрь 1989 г. Анализ указывает на некоторую сезонность загрязнения. Общий объем выброса в среднем за 11 месяцев составил 6374,3 тыс. м^3. Начиная с марта по июль включительно, выбросы в эти месяцы превышали среднюю величину, а с июля по февраль были меньше среднего значения (6374,3 тыс. м^3). Подобная ситуация наблюдалась и в среднем месячном объеме выброса, где средняя величина равнялась 228,2 тыс. м^3. Однако в этом случае период увеличивался с марта по июль.

Максимальные выбросы превышали свою среднюю величину (627 тыс. м^3) с февраля по июль. На минимальных значениях мы не будем останавливаться, т.к. за исключением апреля и мая, они были одного порядка. Дисперсия (σ) была больше среднего значения (181,1 тыс. м^3) с февраля по август. Таким образом, общим периодом для всех видов выбросов, когда они превышали свои средние величины, были март-июль. В другой период (июль-февраль) они оказались меньше средних, особенно сентябрь и октябрь.

Так, в период наибольшего выброса (март-июнь) общий объем составил 10498,1; средний – 344,9; максимальный – 880,8; минимальный – 2,0; среднее квадратическое отклонение – 246,8 тыс. м^3.

Противоположный период (июль-февраль) характеризуется общим количеством выбросов 4017,9 при максимальной величине 482,0 тыс. м^3. Минимум равен 0,07 тыс. м^3. Среднее квадратическое отклонение –143,5 тыс. м^3.

Следует отметить, из сравнения данных табл. 23, для марта-июня и июля-февраля видно, что все величины первого и второго столбцов отличаются примерно в два раза.

Таблица 23

Сезонные колебания загрязнения от залповых выбросов

Наименование	Март – июнь	Июль – февраль
Общий объем выброса (тыс. м^3)	10498,1	4017,9
Средний объем выброса (тыс. м^3)	344,9	161,6
Макс.выброс по суточным данным (тыс. м^3)	880,8	482,0
Мин.выброс по суточным данным (тыс. м^3)	2,0	0,07
σ (тыс. м^3)	246,8	143,5

1.3.3. Современное состояние экологической обстановки природной среды Павлодарской области

1.3.3.1. Общее состояние атмосферного воздуха Павлодарской области

Павлодарская область занимает территорию площадью 127,5 тыс. км^2, население области составляет 807 тыс. человек, в том числе в гг. Павлодаре – 317,8 тыс. человек, Екибастуз – 151,7 тыс. человек, Аксу – 73,2 тыс. человек.

Основные полезные ископаемые сосредоточены в юго-западной части: два угольных бассейна – Екибастузский, Майкубенский. Павлодарская область богата месторождениями медных руд (Бозшаколь), золота (Майкаин), полиметаллических руд и руд редких металлов. В низовьях реки Щидерты открыты крупные залежи бурого железняка, пласты которого выходят на поверхность. Важное значение имеют соленые самоосадочные озера Прииртышья – Большой и Малый Калкаман, Коряковка, Большой и Малый Таволжан. В центральной части области сформировался Павлодар-Екибастузский территориально-промышленный комплекс, ядро которого составляют каскад тепловых электростанций (60% установленной мощности республики), угольные разрезы, алюминиевый, ферросплавный, тракторный, нефтеперерабатывающий и химический заводы, которые являются основными загрязнителями окружающей среды. Структура промышленного производства в области сложилась следующим образом:

– добывающая промышленность – 22,2%;

– обрабатывающая промышленность – 43,3%;

– производство и распределение электроэнергии, газа и воды – 34,5%.

В связи с продолжающимся реформированием экономики и особенно сельского хозяйства, в настоящее время постоянно распадаются крупные предприятия, ликвидируются старые и создаются новые, исчезают фермы, мелкие населенные пункты, совхозы, забрасываются старые карьеры и рудники, открываются новые, что очень затрудняет ведение учета природопользователей и производимого ими загрязнения окружающей среды. Относительно стабильно работают только предприятия теплоэнергетики. Машиностроительные и химические предприятия практически простаивают.

Павлодарская область по количеству выбросов в атмосферный воздух на одного жителя занимает одно из первых мест (в среднем по области – по 0,5 т) (табл. 14–18), превышая среднереспубликанский уровень почти в 4 раза. Однако следует отметить, что практически все предприятия загрязнители атмосферного воздуха, на долю которых приходится свыше 90% выбросов, сосредоточены в гг. Павлодар, Екибастуз и Аксу.

Анализ результатов показал, что в течение последних пяти лет повсеместно имеются разовые превышения ПДК по пыли, оксиду углерода, диоксиду азота, по хлористому водороду, сероводороду и фенолу.

Максимальные из разовых концентраций в г. Павлодаре в течение 2001 года достигали:

– по пыли – 3,4 ПДК, отмечалось в июле;

– по оксиду углерода – 1,4 ПДК, отмечалось в августе.

1.3.3.2. Современное состояние атмосферного воздуха городов Павлодара, Екибастуза и Аксу

Оценка состояния загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния промышленных объектов необходима для выяснения причин формирования возможных высоких уровней концентрации загрязняющих веществ, установления их неблагоприятного влияния на здоровье населения и окружающую среду, разработки мероприятий по охране атмосферы.

Характеристика загрязнения атмосферы города Екибастуза

Исходя из анализа, самые высокие концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе города за рассматриваемые годы составили: по пыли – 5,8 $ПДК_{мр}$ (1990 г.), по NO_2 – 9,1 $ПДК_{мр}$ (1994 г.), по CO – 2,0 $ПДК_{мр}$ (1991–1992 гг.).

Характеристика загрязнения атмосферы города Павлодара

Исходя из анализа, самые высокие концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе города за рассматриваемые годы составили: по пыли – 4,6 $ПДК_{мр}$ (1998 г.), по NO_2 – 4,5 $ПДК_{мр}$ (1997 г.), по CO – 3,4 $ПДК_{мр}$ (1999 г.).

Характеристика загрязнения атмосферы города Аксу

Изучено загрязнение атмосферного воздуха следующими примесями: пыль, диоксид серы, диоксид азота, оксид азота, оксид углерода, сероводород, хлористый водород, фтористый водород.

Загрязнение атмосферы диоксидом серы выявлено с более высокими концентрациями в холодное время года. Так, его среднесуточные значения в г. Аксу составили от 1,7 до 2,3 ПДК. Максимальные разовые концентрации диоксида серы были отмечены в марте (0,32 мг/м^3) и в июне (0,13 мг/м^3).

Концентрации оксида углерода наиболее высокими наблюдались в холодный период года. Повторяемость максимальных разовых концентраций, превышающих ПДК, составила 24,4–42,2% от общего количества проанализированных проб. Среднесуточные концентрации оксида углерода не превышали 3 ПДК. В теплое время года максимальные разовые концентрации были существенно ниже и достигали 6,2–8,4 мг/м^3 с превышением ПДК в 1,2–1,7 раза.

Наиболее высокая запыленность атмосферы города отмечалась на всех постах наблюдения в холодный период года. Максимальные концентрации пыли достигали 4,8–10,8 мг/м^3 и превышали ПДК в отдельных случаях в 10–20 раз. Среднесуточные концентрации пыли достигали 8–23 ПДК.

Анализ данных этих наблюдений не выявил однозначной зависимости между превышением концентрации пыли и повышенными концентрациями диоксида серы, оксида азота, оксида углерода и фтористого водорода. Аномальные концентрации пыли наблюдались при разных ветровых условиях – штиле, ветре северных и южных румбов со скоростью 3–5 м/с. Основная масса результатов по содержанию пыли лежала в пределах 0,7–3 ПДК независимо от направления ветра и точки наблюдения в городе. Нулевые содержания отмечались при ветрах различных румбов, включая северные, и особенно часто – при штилевых условиях в июне. Отсутствие корреляции содержания пыли в воздухе с содержанием газов позволяет предположить ее основными источниками объекты, выбрасывающие только пыль – предприятия стройиндустрии, золоотвалы и т.д.

Низкая изменчивость содержания оксида углерода при различных метеоусловиях дает основание исключить АЗФ из числа источников его высокого содержания в городском воздухе и считать таковыми низкие выбросы частного сектора, мелкие котельные и автотранспорт.

Повышенные содержания фтористого и хлористого водорода, наблюдаемые также при различных неблагоприятных направлениях ветра и его отсутствии, скорее всего, определяются внутригородскими источниками.

Абсолютное содержание металлов, среди которых присутствуют и специфичные для АЗФ, в летнее время было выше, чем в марте. Это позволяет предполагать, что в летнее время в городском воздухе доля примесей, выбрасываемых источниками АЗФ, несколько больше, чем в холодное время.

Анализ динамики валовых выбросов по городу Аксу и результаты натурных исследований позволяют говорить об устойчивом процессе загрязнения воздушного бассейна города Аксу в прошлом и сегодня. При этом, имея в виду, что факелы выбросов загрязняющих веществ АЗФ и АТЭС в момент замеров не «ложились» на жилые зоны, то это загрязнение можно считать своеобразным «фоновым» загрязнением.

Основными загрязнителями приземного слоя воздуха жилых районов являются зола и пыль, несущие с собой широкий спектр тяжелых металлов, в том числе и специфичных для АТЭС и АЗФ. Основными источниками пыли следует считать наряду с дымовыми выбросами АТЭС и АЗФ золошлаконакопители в окрестностях города (включая золоотвалы АТЭС), предприятия стройиндустрии и различные углесжигающие установки, включая печи частных домов в холодный период. Как видно из приведенных таблиц, средние значения концентрации пыли в большинстве проб превышают ПДК (в 1,1–1,9 раза). Однако измерения, проведенные в городе Аксу в ноябре (по первому снегу), показали, что влияние на загрязнение воздушного бассейна города имеет и состояние поверхности территории города (концентрации пыли в этот момент не превышали 0,7 ПДК).

Следующим по значимости загрязнителем нужно считать оксид углерода. Завод ферросплавов, как второй по значимости загрязнитель Аксуского промузла,

реально может иметь отношение к повышенному содержанию оксида углерода в атмосфере города. Однако имеющиеся данные не позволяют однозначно связывать превышение ПДК по оксиду углерода в населенных пунктах с выбросами только АЗФ и предполагают множественность источников его выделения, включая и АТЭС.

Далее на рис. 1–3 и в табл. 24–25 исследованы динамика загрязнения веществ от стационарных источников по Республике Казахстан, областям, промышленным центрам и их сопоставительный анализ по некоторым годам.

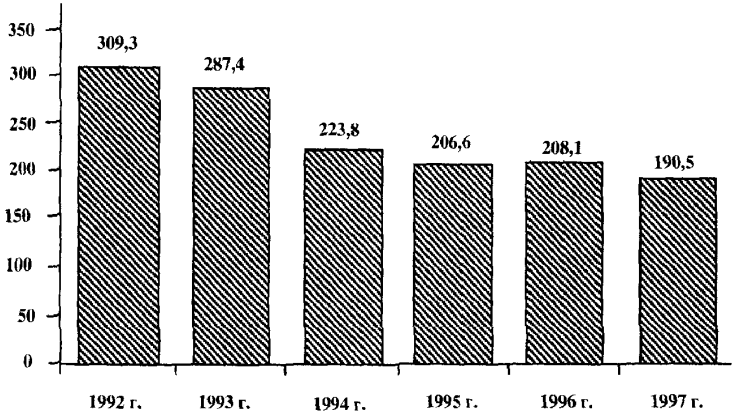


Рис. 1. Динамика загрязнения веществ от стационарных источников по Республике Казахстан и Жамбылской области

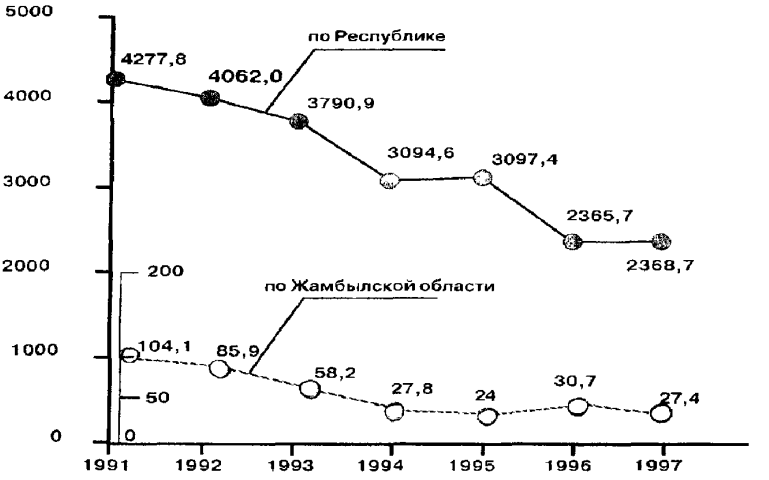


Рис. 2. Динамика индекса загрязнения атмосферы (ИЗА) за 1994–1997 годы по г. Тараз

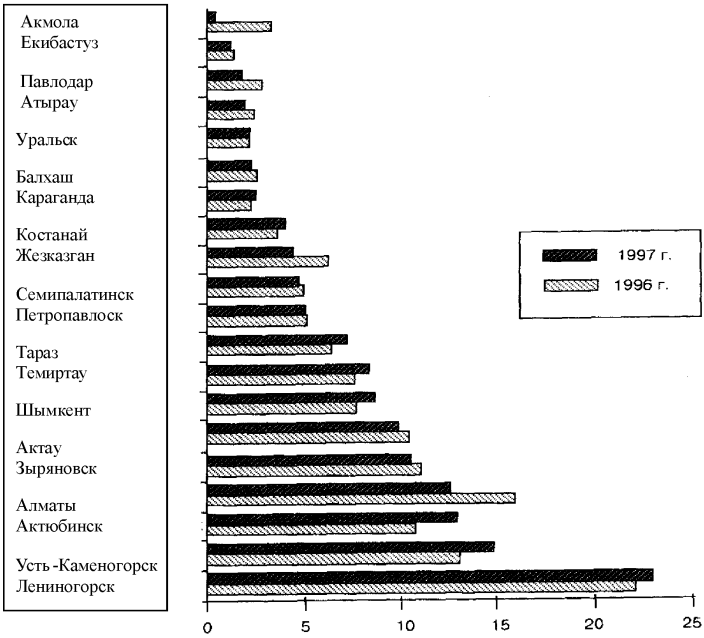


Рис. 3. Сравнение изменения ИЗА по городам республики Казахстан за 1996 и 1997 гг.

Таблица 24

Характеристика радионуклидов в атмосферном воздухе

Наименование	Мощность дозы гамма-излучения на территории области СЭС (мк^3 в/ч)	Суммарная бета-активность атм. воздуха, 10^{-4} (Бк/м^3)	Осадки и оседающая пыль (10^7 Бк/м^2)
1	2	3	4
Акмолинская	0,11	2,02	3,13
Актюбинская	0,10	2,35	2,32
Алматинская	0,15	3,11	0,76
Атырауская	0,10		0,65
Восточно-Казахстанская	0,12		0,99
Жамбылская	0,14		2,18
Западно-Казахстанская	0,09	2,59	1,79
Карагандинская	0,13		2,81
Костанайская	0,10		0,28
Кызылординская	0,09		4,54

Окончание табл. 24

1	2	3	4
Мангистауская	0,12		1,74
Павлодарская	0,11	4,77	0,46
Северо-Казахстанская	0,05		0,89
Южно-Казахстанская	0,12	0,98	1,27
г. Алматы	0,13	1,7203	1,10

Таблица 25

Загрязнение воздушного бассейна городов Республики Казахстан в 1997 г.

Город	ИЗА.факт.		Уровень загрязнения ИЗА. факт. ИЗА. норм.	Название примесей, превыш. ПДК	1997 г.	
	1996 г.	1997 г.			средняя концентрация мг/м^3	кратность превышения ПДК
1	2	3	4	5	6	7
Лениногорск	22,0	22,8	4,5	пыль диоксид серы диоксид азота фенол формальдегид свинец	0,2 0,106 0,08 0,011 0,023 0,58 мкг/м^3	1,3 2,1 2,0 3,7 7,7 1,9
Усть-Каменогорск	13,0	14,8	2,9	диоксид серы диоксид азота фенол формальдегид хлор свинец	0,231 0,08 0,007 0,008 0,03 0,59 мкг/м^3	4,6 2,0 2,3 2,7 1,0 1,9
Актюбинск	10,7	12,8	2,6	диоксид азота формальдегид	0,05 0,015	1,2 5,0
Алматы	15,9	12,5	2,5	диоксид азота фенол формальдегид	0,05 0,004 0,015	1,3 1,3 5,0
Актау	10,3	9,8	1,9	пыль диоксид азота	0,5 0,05	3,3 1,2
Зыряновск	11,0	10,5	2,1	пыль диоксид азота фенол формальдегид	0,4 0,11 0,006 0,009	2,7 2,8 2,0 3,2
Шымкент	7,7	8,6	1,7	пыль диоксид азота формальдегид свинец	0,3 0,05 0,004 0,80 мкг/м^3	2,0 1,2 1,3 2,7
Темиртау	7,6	8,3	1,7	пыль фенол аммиак	0,3 0,007 0,08	2,0 2,3 2,0

Окончание табл. 25

1	2	3	4	5	6	7
Тараз	6,4	7,2	1,4	диоксид азота формальдегид	0,05 0,007	1,2 2,3
Петропавловск	5,1	5,0	1,0	фенол формальдегид	0,004 0,005	1,3 1,8
Костанай	3,6	3,9	0,8	аммиак диоксид азота	0,07 0,04	1,8 1,0
Семипалатинск	4,9	4,7	0,9	пыль диоксид азота	0,3 0,05	2,0 1,2
Уральск	2,2	2,2	0,4	–	–	–
Караганда	2,3	2,5	0,5	–	–	–
Жезказган	6,2	4,4	0,9	диоксид азота фенол свинец	0,05 0,005 0,36 мкг/м^3	1,2 1,7 1,2
Павлодар	2,8	1,7	0,3	–	–	–
Акмола	3,3	0,4	0,1	–	–	–
Балхаш	2,6	2,3	0,4	пыль свинец	0,2 о,49 мкг/м^3	1,3 1,6
Екибастуз	1,3	1,2	0,2	–	–	–
Атырау	2,4	1,9	0,4	пыль	0,2	1,3
Средние по республике	6,5	6,9				

1.4. Статистические показатели влияния атмосферного загрязнения на здоровье населения региона и их анализ

На 1.01.1999 года в Павлодарской области проживало 854 000 человек, городское население составляет 67,6% от этой численности. С 1989 года численность населения региона снизилась на 97200, в основном в связи с миграционными процессами и снижением естественного прироста.

В табл. 26 приведены данные о динамике средней продолжительности предстоящей жизни городского населения Павлодарской области за период 1989–2002 гг. Отметим, что в период 1995–2002 гг. этот показатель изменялся незначительно, и данные 1995 г. могут рассматриваться как актуальные.

Таким образом, за последнее десятилетие произошло существенное снижение средней продолжительности предстоящей жизни населения городов Павлодар, Екибастуз и Аксу.

Этот процесс затронул все без исключения возрастные группы. Для средней продолжительности жизни при рождении уменьшение составило 12,45% у мужчин и 4,49% у женщин. Наиболее сильное падение уровня средней продолжительности жизни произошло для мужчин 40–50 лет (снижение более чем на 20%). Причиной столь существенного уменьшения продолжительности жизни городского населения Павлодарской области стала совокупность процессов,

среди которых ведущее место занимает негативное состояние экономических условий и социальной сферы, а также длительный экзогенный экологический стресс, в том числе и загрязнение атмосферного воздуха.

Таблица 26

Динамика средней продолжительности предстоящей жизни городского населения Павлодарской области (1989–2002 гг.)

Возрастная группа	Мужчины			Женщины		
	1989 г.	1995 г.	процент убыли	1989 г.	1995 г.	процент убыли
0	64,92	56,84	12,45	73,93	70,61	4,49
1	65,76	57,94	11,89	74,51	71,01	4,70
5	62,02	54,19	12,62	70,77	67,39	4,78
10	57,23	49,35	13,77	65,91	62,51	5,16
15	52,40	44,56	14,96	60,96	57,62	5,48
20	47,71	39,92	16,33	56,05	52,75	5,89
25	43,21	35,60	17,61	51,20	47,89	6,46
30	38,73	31,39	18,95	46,38	43,18	6,90
35	34,31	27,40	20,14	41,68	38,49	7,65
40	30,04	23,77	20,87	36,92	33,98	7,96
45	26,00	20,40	21,54	32,33	29,63	8,35
50	22,01	17,25	21,63	27,89	25,44	8,78
55	17,95	14,71	18,05	23,76	21,61	9,05
60	14,58	12,46	14,54	19,75	17,85	9,62
65	11,77	10,46	11,13	15,91	14,68	7,73
70	9,61	8,52	11,34	12,78	11,45	10,41
75	7,29	6,91	5,21	9,88	8,57	13,26
80	5,62	5,23	6,94	7,52	6,55	12,90
85	4,82	4,13	14,32	5,59	5,05	9,66

Отметим, что на различных этапах реализации региональной программы «Профилактика» было показано, что динамика средней продолжительности предстоящей жизни населения региона синхронна с изменениями качества окружающей среды. Так, в городе Екибастузе этот показатель зависит от объема выбросов в атмосферу твердых, жидких и газообразных веществ предприятий теплоэнергетики и угольной промышленности (коэффициент детерминации от 60 до 80%).

1.4.1. Модели экологической оценки влияния атмосферного загрязнения от стационарных источников на состояние здоровья населения городов Павлодар, Екибастуз и Аксу

Проблема оценки влияния загрязнения окружающей среды на состояние здоровья населения сохраняет свою актуальность в современных условиях. Стратегией «Казахстан-2030», а также Государственной Программой «Здоровье народа» улучшение окружающей среды определено в качестве одного из основных инструментов оздоровления населения.

Атмосферный воздух как основная среда обитания человека играет в этом процессе одну из ведущих ролей. От качества атмосферного воздуха во многом зависит стабильность взаимодействия человеческого организма с окружающей средой – процессы физического развития, заболеваемость, медико-демографические параметры. Атмосферный воздух не только воздействует на человека непосредственно, но и служит транспортирующей средой, обусловливая загрязнение почвенного покрова, водных источников, растительности и продуктов питания человека.

Для городских местностей Павлодарской области эти вопросы имеют исключительно важное значение. В среднем в течение последнего десятилетия в регионе на 1 км^2 поверхности земли приходилось порядка 2551,28 кг выбрасываемых в атмосферу твердых загрязняющих веществ в год. Это в 222 раза выше, чем в Мангистауской области, 5 раз выше, чем в Восточно-Казахстанской области. Высока также нагрузка, производимая на состояние атмосферного воздуха за счет выбросов газообразных веществ (в этом отношении Павлодарская область также находится на одном из первых мест в стране). Все это обусловливает возникновение ряда существенных проблем для здоровья населения области, в первую очередь, на городских территориях.

В целом, по данным проведенных в регионе научных исследований, четыре основных экологических фактора могут считаться активно воздействующими на здоровье – это, в порядке убывания степени остроты проблемы:

– последствия влияния ядерных испытаний;

– загрязнение атмосферного воздуха;

– загрязнение растениеводческой продукции (в значительной мере также являющееся следствием атмосферного загрязнения);

– загрязнение водных ресурсов.

При этом важно понимать, что механизм влияния атмосферного загрязнения на человеческую популяцию гораздо сложнее, чем это может быть выражено в терминах любой из упрощенных однофакторных моделей.

На рис. 4 показана предложенная нами модельная интерпритация трех основных существующих подходов к проблеме.

Нельзя не учитывать тот факт, что концепция пороговой модели воздействия загрязнения окружающей среды на здоровье (предполагающая существование абсолютно безопасного уровня загрязнения) в свете современных научных представлений является лишь первым приближением реального процесса.

Как мы полагаем, более актуальной является беспороговая модель риска с существованием различных коэффициентов риска для уровней ниже и выше ПДК (разные углы наклона соответствующей прямой – рис. 4, б), либо беспороговая нелинейная модель риска, которая может быть представлена гладкой экспоненциальной кривой (рис. 4, в).

При оценке влияния атмосферного загрязнения на состояние здоровья людей следует базироваться на следующих основных тезисах:

– риск возникновения заболевания возрастает с ростом концентрации загрязнителя в воздухе, усредненной за некоторый период времени;

– риск нарушений здоровья может быть усилен за счет присутствия в атмосферном воздухе не одного, а нескольких загрязнителей;

– риск нарушений здоровья может быть усилен за счет существенных всплесков загрязнения, либо за счет постоянного изменения состояния окружающей среды, что затрудняет приспособление популяции к ее химическим характеристикам;

– риск является популяционной вероятностной характеристикой и может быть эффективно исследован на уровне показателей, характеризующих здоровье популяции в целом в большей степени, чем при исследовании индивидуальной реакции.

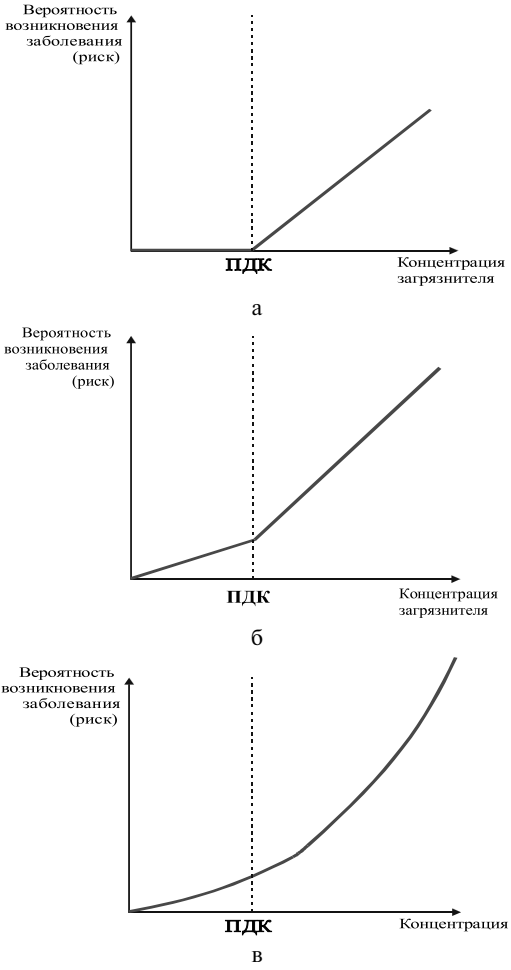


Рис. 4. Основные типы моделей влияния атмосферного загрязнения на здоровье популяции:
а – линейная пороговая модель; б – линейная беспороговая модель;
в – нелинейная беспороговая модель

В связи с этим нами придавалось большое значение сбору и анализу различных показателей, характеризующих состояние здоровья и медико-демографической ситуации для городских жителей Павлодарской области в сопоставлении с показателями загрязнения атмосферного воздуха.

Важно также видеть территориальный аспект проблемы, состоящий в том, что люди, проживающие в различных районах города, испытывают разную медико-экологическую нагрузку на организм.

На рис. 5 демонстрируется территориальное районирование города Павлодара, выполненное на основе математического моделирования рассеивания загрязняющих веществ (в единицах комплексного показателя $K_{сум}$).

Таким образом, западная часть территории города, где значения $K_{сум}$ колеблются в пределах от 2,6 до 4,8, находится в более благоприятных условиях с точки зрения формирования здоровья населения, по сравнению с восточной, где значение $K_{сум}$ достигают 13.

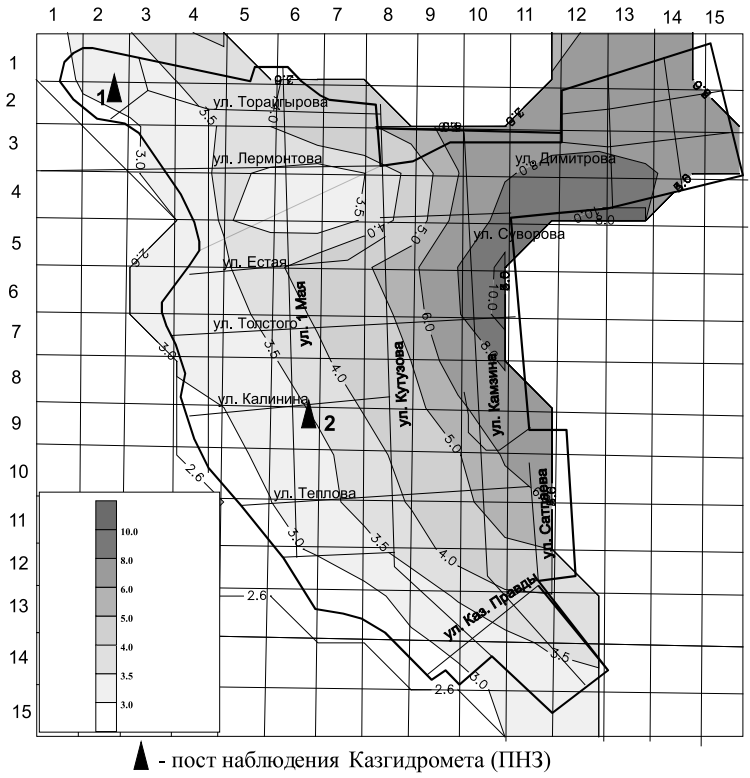


Рис. 5. Районирование селитебной территории города Павлодара по комплексному показателю загрязнения атмосферного воздуха (масштаб 1:50000)

Выполненные в рамках программы «Профилактика» исследования, показывают, что территориальная специфика состояния среды и здоровья в пределах городских территорий имеет место как для Павлодара (различный уровень заболеваемости в детских садах различных районов города, данные о различиях в состоянии здоровья двух выборочных групп населения в двух районах города и т.д.), так и для Аксу (различия в состоянии здоровья между жителями города и поселка ГРЭС) и Екибастуза (различия в уровне физического развития и заболеваемости детей в разных детских садах).

В настоящей работе впервые выполнена систематизация разнообразной информации о влиянии атмосферного воздуха на здоровье населения в городах Павлодарской области, а также проведено специальное исследование и моделирование возможной зависимости параметров здоровья от параметров состояния атмосферы. Исследовано порядка 62500 корреляционных связей, в числе которых отобраны статистически значимые. Проанализирована медико-демографическая ситуация в регионе. Сформирован банк данных о состоянии атмосферы и заболеваемости населения региона в период с 1989 по 1998 годы.

Все приводимые в работе корреляционные связи значимы при $P < 0{,}05$.

На рис. 6 показана динамика показателей общей смертности населения городов Павлодара, Екибастуза и Аксу в сопоставлении со среднереспубликанскими данными. Общая республиканская тенденция к росту смертности, как видно из графика, имеет существенную специфику для городов региона. Для Аксу и Павлодара направлением тенденции становится стабилизация на значимо более высоких уровнях по сравнению со среднереспубликанской ситуацией. Начиная с 1994 года, несколько снижается общая смертность в Екибастузе. В определенной степени в этой динамике участвует и влияние факторов загрязнения окружающей среды. Например, было установлено, что в городе Павлодаре смертность по причине инфекционных и паразитарных болезней в определенной степени связана с загрязнением атмосферного воздуха пылью, SO_2, Cl_2, NO_2; по причине новообразований – *с загрязнением пылью; болезней органов дыхания – щелочью,* CO, SO_2.

Рис. 6. Динамика показателей общей смертности населения городов Павлодарской области и Республики Казахстан (на 1000 населения, 1989–1998 годы)

В городе Екибастузе наблюдается прямая сильная корреляционная связь между объемом выбросов сернистого ангидрида в атмосферу и смертностью мальчиков на первом году жизни от врожденных аномалий, а также смертностью мужчин от болезней системы кровообращения в возрастных группах 55–59 лет. В связи с этим снижение показателей общей смертности в Екибастузе, начиная с 1994 года, может быть в определенной степени объяснено падением производства и снижением антропогенной нагрузки на атмосферный воздух.

В городе Аксу дисперсия показателя остаточной смертности (определяемого как разность между городским и республиканским показателями) на 16–22 % может быть объяснена рядом параметров, характеризующих загрязнение атмосферного воздуха суммарным («накопленным») объемом выбросов NO_x, SO_2, CO, V_2O_5, золы АТЭС, чистого хрома, CO АЗФ.

Павлодарская область на протяжении всего исследуемого периода характеризовалась сложной негативной динамикой младенческой смертности. По городу Екибастузу в 1993 году показатель превышал 40,0 на 1000 родившихся (в Японии в тот же период показатель был на порядок ниже – 4,2 на 1000 родов).

В определенной степени это может быть связано с совместным действием двух факторов – последствий деятельности Семипалатинского испытательного ядерного полигона и загрязнением атмосферного воздуха.

Следует обратить внимание на тот факт, что уровень рождаемости в городе Павлодаре обратно коррелирует с максимальными концентрациями CO на ПНЗ № 1 ($r = -0{,}72$, коэффициент детерминации 51,8 %). Эти данные смыкаются с ранее установленными фактами о существовании обратной зависимости показателей рождаемости по регионам страны и показателей заболеваемости новообразованиями, что свидетельствует не только о социально-экономической, но и об экологической обусловленности процессов рождаемости, являющихся функцией репродуктивного здоровья нации.

1.4.2. Показатели состояния здоровья городского населения Павлодарской области и их обусловленность влиянием атмосферного загрязнения

Общепризнанно, что показатель первичной (впервые выявленной) заболеваемости населения (в расчете на 100 000 населения) является эффективной интегральной характеристикой риска возникновения заболевания в популяции.

Нам удалось установить целый ряд фактов, свидетельствующих об обусловленности риска заболеваемости населения города Аксу факторами загрязнения атмосферного воздуха.

Установлено, что на 0,001 мг/м^3 сернистого ангидрида в города Павлодаре приходится 3494 дополнительных случаев заболеваемости детей в расчете на 100 000 человек, на 0,001 мг/м^3 окислов азота – дополнительных 1601 случаев заболеваемости.

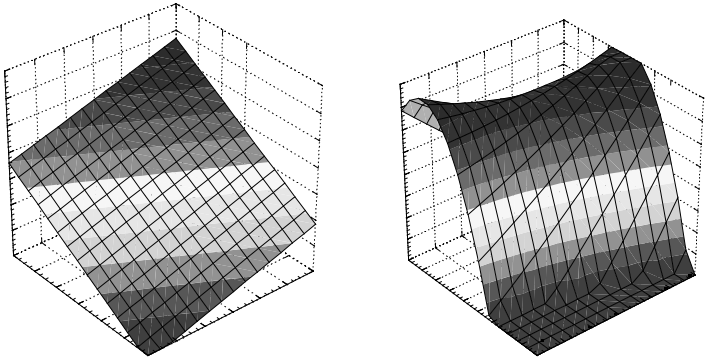
Зависимость первичной заболеваемости всего населения города Екибастуза от максимальных концентраций пыли и NO_2 на ПНЗ № 3 имеет более сложную форму, однако также заболеваемость увеличивается при возрастании загрязнения атмосферы (рис. 7).

Установлено также, что первичная заболеваемость взрослого населения города Павлодара возрастает при увеличении средних концентраций окислов азота

на 1 ($r = 0,89$), 2 ($r = 0,74$) и 3 ($r = 0,86$) постах наблюдения загрязнения атмосферы. Заболеваемость взрослого населения Екибастуза зависит от средних концентраций сернистого ангидрида на ПНЗ № 3.

Отметим, что по данным программы «Профилактика» имеет место значимая дифференциация первичной заболеваемости по территории города Павлодара. В районе, ограниченном улицами Свердлова-Калинина-Пахомова-Абая, процент «здоровых» семей был равен $18,59 \pm 4,4$, число диагнозов на 1 семью составляло $4,49 \pm 0,52$, тогда как в районе, ограниченном улицами Куйбышева и Айманова, здоровых семей было $4,48 \pm 2,8$, число диагнозов на семью было равно $9,23 \pm 0,95$.

Загрязнение атмосферного воздуха способно отражаться на тонких механизмах поддержания стабильности на межпопуляционном уровне, а также в существенной мере снижать иммунный статус человека, переориентируя защитные силы организмов с одних направлений на другие.



а б

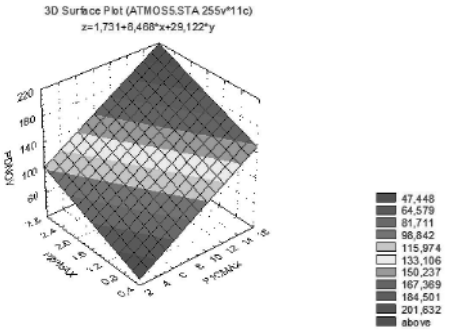
Рис. 7. Моделирование зависимости первичной заболеваемости (ПЗ) населения городов Павлодарской области от загрязнения атмосферного воздуха:
а – линейная зависимость ПЗ детского населения в городе Павлодаре от средней концентрации SO_2 на 2 посту и NO_2 на ПНЗ № 3; б – зависимость ПЗ всего населения города Екибастуза от максимальных концентраций пыли и NO_2 на ПНЗ № 3

Обращает на себя внимание тенденция к росту показателей инфекционной заболеваемости по городу Павлодару (несмотря на относительно высокий социально-бытовой уровень в городе), а также наличие исключительно высоких всплесков заболеваемости в Екибастузе.

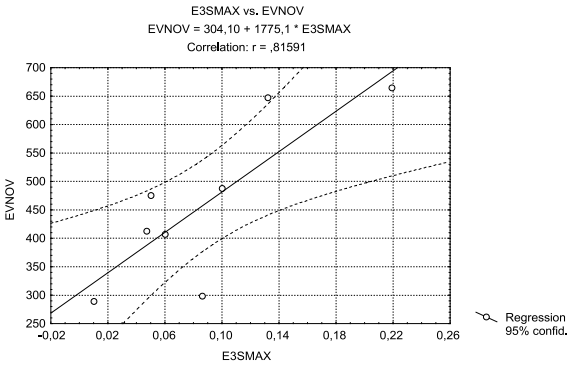
Отметим, что повсюду в городской местности региона заболеваемость инфекционными болезнями значительно выше, чем в Республике Казахстан в среднем (для города Павлодара в 1998 году превышение составляло 1,6 раза).

Окружающая среда напрямую определяет заболеваемость населения новообразованиями, однако, дозовые эффекты могут наблюдаться лишь на крупных выборках в течение длительного времени наблюдения. Тем не менее, нам удалось установить ряд закономерностей, которые могут свидетельствовать о влиянии загрязнения окружающей среды на этот показатель.

На рис. 8 иллюстрируются отдельные из полученных нами моделей зависимости заболеваемости новообразованиями от загрязнения атмосферы. На 1 мг/м^3 окиси углерода приходится 8,4 дополнительных случаев новообразований, на 0,1 мг/м^3 пыли – дополнительных 2 случая новообразований у детей города Павлодара в расчете на 100 000 жителей. На 0,01 мг/м^3 сернистого ангидрида приходится дополнительных 17,7 случаев новообразований у взрослых города Екибастуза в расчете на 100 000 жителей.



а



б

Рис. 8. Зависимость заболеваемости новообразованиями от загрязнения атмосферного воздуха: а – заболеваемость детей г. Павлодара зависит от максимальных концентра-ций СО на ПНЗ № 1 и пыли на ПНЗ № 2; б – заболеваемость взрослых города Екибастуза зависит от максимальных концентраций SO_2 на ПНЗ № 3

Нельзя не отметить также, что на протяжении многолетних исследований в рамках программы «Профилактика» установлено множество фактов влияния атмосферного загрязнения на ранние стадии заболеваний нервной системы – общую астенизацию, утомляемость, хронические головные боли и т.д.

Работами Р. Ольсена, Дж. Расмусона, Б. Коула, Т. Слажневой, А. Корчевского (1996–1998 гг.) показано, что загрязнение атмосферы города Павлодара свинцом может оказывать определенное влияние на нарушение интеллектуального развития детей дошкольного возраста.

При этом, если общий высокий уровень врожденных аномалий в регионе может быть объяснен последствиями ядерных испытаний на близлежащем Семипалатинском полигоне, то всплеск заболеваемости в городе Аксу в период с 1990 по 1994 год требует регионального объяснения.

На рис. 9 в виде сложного пространственного соотношения иллюстрируется зависимость заболеваемости детей города Павлодара врожденными аномалиями от максимальных концентраций окиси углерода на ПНЗ № 1 и пыли на ПНЗ № 2. Эта заболеваемость прямо коррелирует с соответствующими показателями (соответственно, с коэффициентами корреляции 0,84 и 0,66), однако пространственная модель показывает, что реальное влияние загрязнения атмосферы на здоровье имеет сложный механизм, в том числе включая взаимное усиление и ослабление реакции.

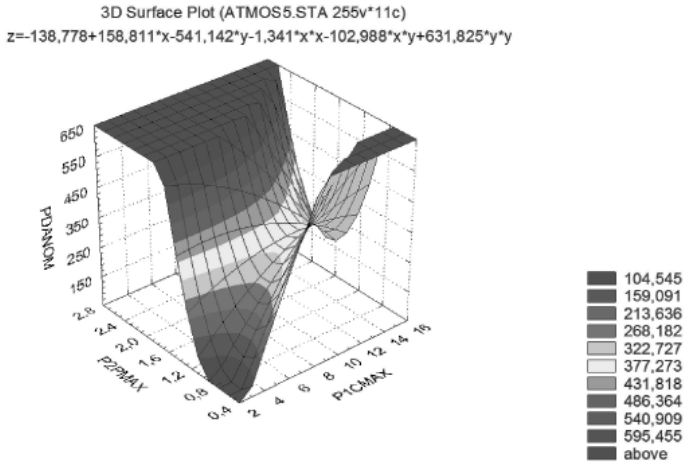


Рис. 9. Соотношение между заболеваемостью детей города Павлодара врожденными аномалиями и загрязнением атмосферы пылью и окисью углерода

Имеют место также иные свидетельства о влиянии атмосферного воздуха на состояние здоровья населения этих городов. Например, нельзя не отметить фактов влияния атмосферного загрязнения на физическое развитие детей дошкольного возраста в городе Екибастузе (пыль угля влияет на формирование дефицита массы, окислы азота – на отклонения роста от нормы).

У жителей города Екибастуза помимо высокого уровня аберраций хромосомного типа в лимфоцитах периферической крови (маркеров радиационного воздействия) выявлен также высокий уровень аберраций хроматидного типа

(маркеров химического воздействия), что может свидетельствовать об активном влиянии химического загрязнения атмосферы на базовые подсистемы человеческого организма.

На основании изученного и обобщенного нами материала, выполненного статистического анализа и математического моделирования можно сделать следующие выводы:

– загрязнение атмосферного воздуха в городах Павлодар, Екибастуз и Аксу оказывает существенно влияние на состояние здоровья населения;

– неблагоприятное состояние окружающей среды в исследуемых районах отражается на демографических показателях, общей заболеваемости, физическом развитии детей, уровне риска возникновения патологий дыхательной, эндокринной, кроветворной и иных важных систем человеческого организма.

Основными популяционными маркерами неблагоприятного воздействия атмосферного воздуха на здоровье жителей городов Павлодар, Екибастуз, Аксу являются:

– наличие статистически-значимых территориальных различий в состоянии здоровья субпопуляций, проживающих на различающихся по степени загрязнения атмосферы территориях;

– регистрация статистически-значимой обусловленности динамики показателей здоровья изменениями в химическом составе атмосферного воздуха;

– обнаружение экзогенных изменений в отдельных организмах (например, хромосомные аберрации).

1. Удается обнаружить влияние на состояние здоровья всех основных поллютантов: сернистого ангидрида, окиси углерода, окислов азота, пыли, щелочи и др. На здоровье населения влияют как высокие средние концентрации загрязняющих веществ, так и резкие разовые всплески концентраций.

2. В наибольшей степени риску возникновения обусловленного загрязнением атмосферы заболевания подвержены подростки и дети, в особенности – дошкольного возраста.

Вышесказанное требует осуществления дальнейших действий по снижению неблагоприятного влияния загрязнения атмосферы на здоровье в рамках Стратегии «Казахстан-2030», где говорится о необходимости «нарастающих усилий» по улучшению окружающей среды.

При этом остается актуальным продолжение глубоких исследований механизмов воздействия атмосферных загрязнителей на состояние здоровья жителей области. Необходимо установление параллельного мониторингового слежения за загрязнением атмосферы и целевыми группами населения. Важные теоретические и практические результаты могли бы дать осуществление экспериментального воссоздания условий среды в городах области и тестирование ее токсичности (в том числе и с применением приборного моделирования по методике M. Drexler, Colorado University).

Сохраняет свою актуальность также разработка приемов и методов снижения риска атмосферного загрязнения для здоровья путем повышения иммунного статуса населения региона. Все это в целом может дать значимый социальный и экономический эффект.

Изучение и моделирование распространения газо-аэрозольных веществ требует знания трех метеорологических элементов, определяющих поведение введенных в атмосферу веществ: полей ветра, температуры и различных фаз воды. Наиболее существенным является поле ветра (скорость и направление), определяющие адвективный перенос загрязняющих веществ. Адвективный перенос определяет расстояние, на которые переносятся загрязняющие вещества, их ареал распространения, время пребывания этих веществ в атмосфере и уровни концентрации в отдельных районах. Горизонтальная диффузия в среднем в пять раз меньше адвекции и ее детальным описанием можно пренебречь, параметризовав через постоянный в пространстве и времени коэффициент горизонтальной диффузии.

Важной задачей науки в настоящее время является оценка загрязнения атмосферы и подстилающей поверхности пассивными и активными примесями и современного состояния изменений экосистем под влиянием естественных и антропогенных факторов, а также прогнозирование состояния данных экосистем в будущем. Исходным моментом является исследование процесса загрязнения окружающей среды выбросами отходов промышленных предприятий, следующий этап заключается в оценке воздействия вредных загрязнении на биологическую среду.

Ухудшение экологической обстановки явилось результатом искусственного нарушения количества и соотношения химических элементов и их комплексов в окружающей среде, которые вызывали нарушение нормального хода биохимических реакций в живых организмах, выработанных в них в течение геологического времени развития. Поэтому, в настоящее время во всех странах мира разрабатываются гео-эколого-экономические прогнозы, позволяющие научно определить взаимосвязи в системе Человек-Природа.

Для сохранения среды обитания требуется решать задачи ограничения выбросов действующих предприятий и оптимального размещения, вновь создаваемых промышленных объектов с учетом допустимых нагрузок на экологически значимые зоны. Решение этих и других, возникающих здесь, задач требует использования математических моделей, описывающих распространение примесей в атмосфере от различных типов источников. Сведения о таких моделях, разработанных в разное время, представлены в работах [10, 14, 15, 37].

Из рассмотренных в начале этого раздела промышленных регионов Павлодарской, Западно-Казахстанской и других областей видно, что степень загрязнения нижних слоев атмосферы вредными веществами зависит не только от технологических и конструктивных параметров, но и от ряда метеорологических факторов, которые определяют процесс распространения примесей в пограничном слое атмосферы.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ

Выведены основные уравнения динамики реальной атмосферы в поле массовых сил и уравнения горизонтального движения с учетом неровности земной поверхности. Получено уравнение баланса влаги в атмосфере, где средняя вертикальная скорость движения среды определяется как взвешенная по плотностям фаз и компонентов вертикальной скорости. Выведено уравнение притока тепла. Рассмотрены наиболее существенные из них. В уравнениях движения учтены неоднородности атмосферных сред, где вертикальные конвективные движения вычислены методом слоя или частиц по данным температуры и влажности.

При исследовании бароклинных процессов в сжимаемой атмосфере выявлено, что важными факторами, играющим большую роль в динамике бароклинных преобразований, являются внешние притоки тепла. Получены прогностические уравнения для сглаженных значений метеорологических элементов в сжимаемой атмосфере, которые при заданных внешних радиационных притоках тепла и соответствующих начальных и краевых условиях служат системой для определения осредненных метеорологических элементов.

Выведены уравнения для изменения давления во влажной атмосфере и уравнение для неадвективных изменений давления при отсутствии конденсации. Получена оценка роли турбулентной диффузии. Показана существенность роли горизонтального турбулентного переноса механической энергии (ε_{π}) в динамике циклона, особенно заметна ее роль в конечной стадии развития.

Получена численная модель неадвективных изменений давлений. Изучена динамика вертикальных движений в облачной атмосфере. Выведены уравнения для вертикальной скорости в насыщенной и влажной ненасыщенной атмосфере. Проведены расчеты вертикальных движений в многослойной облачной атмосфере и вблизи облаков. Проведена параметризация конвективных процессов в численных прогнозах с учетом фронтальных поверхностей при расчете вертикальных движений. Получена численная модель бароклинных процессов атмосферы и краткосрочного прогноза. Получены основные уравнения атмосферной циркуляции и конечно-разностная схема решения этой задачи с учетом приземного трения и орографии с применением полуявной схемы реализации прогностической модели.

Рассмотрены возможности учета турбулентного обмена между океаном и атмосферой. Проведены экспериментальная проверка алгоритмов, описывающих динамический эффект орографии и трения.

Доказана эффективность использования интегральной модели в численных схемах долгосрочных прогнозов погоды и для описания радиационной структуры атмосферы. Проведены расчеты по многоуровневым и 5-уровневым данным модели атмосферы. Сравнение показало, что 5-уровненная модель достаточно хорошо описывает вертикальное распределение *и*. Выявлены особенности расчета радиационных притоков тепла для облачных случаев.

2.1. Основные уравнения динамики реальной атмосферы

По мере развития мощности ЭВМ появляется возможность вводить в численные модели физические факторы, приближающие их к условиям реальной атмосферы. Поэтому введем в модели механизм фазовых переходов воды в атмосфере, параметризации явлений подсеточного масштаба в прогностических моделях, детальный учет процессов в планетарном пограничном слое, влияние радиационных и турбулентных переносов энергии на развитие крупномасштабных процессов, учет геофизических свойств Земли и целого ряда других явлений [12–301].

Моделирование реальной атмосферы с применением уравнений гидротермодинамики требует привлечения влажности как одного из важнейших параметров природы. Точное прогнозирование элементов водного баланса (влагосодержание, водность облаков, осадки, испарение) во многом предопределяет успех предсказания атмосферных процессов. Особую трудность представляет моделирование процессов, связанных с фазовыми переходами воды в атмосфере. Процессы конденсации, изменения термодинамического состояния атмосферы приводят к существенному изменению циркуляции. Особенно важно выявление воздействия конденсационных процессов на крупномасштабные элементы циркуляции и наоборот.

Помимо проблемы включения фазовых процессов в гидротермодинамические уравнения, здесь уделено внимание к представлению в уравнениях движения массовых сил и на возможность исключения предположения о равенстве нулю горизонтальных градиентов потенциала силы тяжести.

В работе Хинкельмена [130, 168, 193] детально описаны, с метеорологической точки зрения, выводы уравнений гидродинамики на вращающейся Земле. Вопросу важности учета неоднородности силы тяжести под воздействием центробежной силы вращения Земли и введению этого фактора в уравнения движения посвящена работа [59].

В работе [130, 168] обращено внимание на то, что помимо чисто геофизических причин потенциал силы тяжести горизонтально неоднороден в результате влияния самой атмосферы. Эта неоднородность особенно существенно сказывается на высотах. Поэтому модели прогноза и исследования процессов верхней атмосферы могут быть уточнены путем использования более точных представлений массовых сил в уравнениях движения.

2.1.1. Уравнения движения реальной атмосферы в поле массовых сил

Особенностью учета орографии в численных моделях является то, что он тесно связан с включением горизонтальной неоднородности массовых сил посредством определения потенциала силы тяжести в реальной атмосфере. Возьмем уравнения движения в векторной форме Громеко-Ламба для системы координат, вращающейся вместе с Землей:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + grad\frac{V^2}{2} + rotV \cdot V = -\frac{1}{\rho} gradP + G - 2\vec{\omega} \cdot V + D,$$

где $\vec{\omega}$ – вектор угловой скорости вращения Земли; D – вектор диссипативных сил; $G = G(q_1, q_2, q_3)$ – вектор ускорения силы тяжести; $V = V(v_1, v_2, v_3)$ – вектор

скорости; v_1, v_2, v_3 – компоненты вектора скорости по осям криволинейной системы координат q_1, q_2, q_3:

$$(qrad)_{q_i} = \frac{1}{H_i}\frac{\partial \varphi}{\partial q_i}; \quad (rotV)_{q_1} = \frac{1}{H_2 H_3}\left(\frac{\partial H_3 v_3}{\partial q_2} - \frac{\partial H_2 v_2}{\partial q_3}\right);$$

$$(rotV)_{q_2} = \frac{1}{H_1 H_3}\left(\frac{\partial H_1 v_1}{\partial q_3} - \frac{\partial H_3 v_3}{\partial q_1}\right); \quad (rotV)_{q_3} = \frac{1}{H_1 H_2}\left(\frac{\partial H_2 v_2}{\partial q_1} - \frac{\partial H_1 v_1}{\partial q_2}\right).$$

Введем в качестве дополнения до геодезической широты α, тогда q_2 будет геодезической долготой λ, а q_3 направим по нормали к эллипсоиду Земли. Расстояние любой точки M от ее проекции на поверхность эллипсоида M_1 будем измерять высотой ξ.

Связь абсолютных координат с вновь введенными осуществляется посредством следующих формул:

$$x = [a(\alpha)\cdot\sin\theta + \xi\cdot\sin\alpha]\cos\lambda;$$

$$y = [a(\alpha)\cdot\sin\theta + \xi\cdot\sin\alpha]\sin\lambda;$$

$$z = a(\alpha)\cdot\cos\theta + \xi\cdot\cos\alpha, \tag{2.1}$$

где $\theta = \theta(\alpha)$ – дополнение до геодезической широты. Разность между геодезической и географической широтами представляется формулой:

$$\alpha - \theta = -\operatorname{arctg}\left[\frac{d\ln a(\alpha)}{d\alpha} \Big/ \frac{d\theta(\alpha)}{d\alpha}\right], \tag{2.2}$$

а коэффициенты Ламэ можно записать в следующем виде:

$$H_1 = a(\alpha)\cdot h_1(\alpha, \xi); \qquad H_2 = a(\alpha)\cdot h_2(\alpha, \xi)\sin\alpha; \qquad H_3 = 1, \tag{2.2′}$$

где $h_1 = \frac{1}{a}\sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \alpha}\right)^2}$; $h_2 = \frac{1}{a\sin\alpha}\sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \lambda}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \lambda}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \lambda}\right)^2}$.

Воспользовавшись (2.1) и (2.2), для h_1, h_2 получим:

$$h_1 = \frac{d\theta / d\alpha}{\cos(\alpha - \theta)} + \frac{\xi}{ad} \approx \frac{d\theta}{\alpha}\sec(\alpha - \theta); \quad h_2 = \frac{\sin\theta}{\sin\alpha} + \frac{\xi}{a} \approx \frac{\sin\theta}{\sin\alpha}. \tag{2.3}$$

Предложенная система координат ортогональна

$$\sum_{i=1}^{3}\frac{\partial S_i}{\partial q_i}\cdot\frac{\partial S_i}{\partial q_k} = 0 \ (j \neq k),$$

где $S_1 = x$, $S_2 = y$, $S_3 = z$.

Если за эту поверхность принять явно эллипсоид вращения, то все формулы приводится более простому виду:

$$x = \left[\frac{a_э}{\sqrt{1 - e^2\cos^2\alpha}} + \xi\right]\sin\alpha\cos\lambda; \tag{2.4}$$

$$y = \left[\frac{a_э}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \alpha}} + \xi \right] \sin\alpha \sin\lambda; \tag{2.5}$$

$$z = \left[\frac{a_э (1 - e^2)}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \alpha}} + \xi \right] \cos\alpha \tag{2.6}$$

В эти формулы входят два параметра, определяющие эллипсоид: $\epsilon_э$ – радиус Земли в плоскости экватора и квадрат эксцентриситета $e^2 = \frac{a_э^2 - a_г^2}{\epsilon_э^2}$. Эксцентриситет легко можно выразить через другую удобную характеристику эллипсоида – через сжатие $S \left(S = \frac{a_э - \epsilon_г}{\epsilon_э} \right)$ следующим образом: $e^2 = 2S - S^2$. Найдем радиус-вектор точки $M_1(a)$.

В меридиональном сечении для эллипсоида имеем:

$$M_1K = \frac{a_э \sin\alpha}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \alpha}}; \quad OK = \frac{a_э (1 - e^2)}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \alpha}} \cos\alpha,$$

откуда

$$a = \frac{a_э}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \alpha}} \sqrt{1 - 2e^2 \left(1 - \frac{e^2}{2}\right) \cos^2 \alpha} =$$

$$= a_э \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \alpha} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{e^4 \sin^2 \alpha}{(1 - e^2 \cos^2 \alpha)^2}} \approx a_э \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \alpha}.$$

Тогда

$$\frac{da}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^2 \sin 2\alpha}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \alpha}} a_э; \quad \frac{d \ln a}{d\alpha} = \frac{e^2 \sin 2\alpha}{2(1 - e^2 \cos^2 \alpha)}. \tag{2.7}$$

Связь между геоцентрической и геодезической широтами осуществляется посредством выражения:

$$\operatorname{ctg}\theta = (1 - e^2) \operatorname{ctg}\alpha. \tag{2.8}$$

Дифференцируем это выражение по α, кроме того, из (2.2) следует:

$$\frac{d\theta}{d\alpha} = \frac{d \ln a}{d\alpha} \operatorname{ctg}(\theta - \alpha), \tag{2.9}$$

а из (1.8)

$$\sin(\alpha - \theta) = -e^2 \sin\theta \cos\alpha. \tag{2.10}$$

Тогда $H_1 = a\left(\frac{d\theta}{d\alpha}\cdot\frac{1}{\cos(\theta-\alpha)}+\frac{\xi}{a}\right)$, и подставляя сюда (2.9) и используя (2.7), получим:

$$H_1 = a\left(\frac{ae\sin\alpha}{\sqrt{a^2-a_э^2\left(1-e^2\right)}}\cdot\frac{1}{1-e^2\cos^2\alpha}+\frac{\xi}{a}\right)\approx$$

$$\approx a_э\left[\frac{a_э e\sin\alpha\sqrt{1-e^2\cos^2\alpha}}{\left(1-e^2\cos^2\alpha\right)\sqrt{a_э^2\left(1-e^2\cos^2\alpha\right)-a_э^2\left(1-e^2\right)}}+\frac{\xi}{a}\right]\times \tag{2.11}$$

$$\times\sqrt{1-e^2\cos^2\alpha}=a_э+\xi;$$

$$H_2 = a\sin\alpha\left[\frac{1}{\sqrt{1-e^2\cos^2\alpha}}+\frac{\xi}{a}\right]=(a_э+\xi)\sin\alpha. \tag{2.12}$$

Итак, в практических задачах решение (2.2) с коэффициентами Ламэ из (2.2′) представляют определенные трудности, а нами для коэффициентов Ламэ получены, с точностью до величин e^4, очень простые выражения, по форме совпадающие с коэффициентами Ламэ для сферы.

Полученные уравнения удобно использовать при описании движения реальной атмосферы в поле массовых сил и при определении связи между геоцентрической и геодезической широтами для объективной оценки экологической обстановки окружающей среды.

2.1.2. Учет неровностей земной поверхности

Наличие реального рельефа вызывает ряд технических трудностей при представлении в конечных разностях уравнений гидротермодинамики вблизи нижней границы атмосферы. Для преодоления этих трудностей обычно вводят новую систему координат, в которой нижняя неровная поверхность переходит в плоскость (или эллипсоид, сферу). Это достигается тем, что новые координаты трансформирует поле только по одной переменной (ξ), оставляя его в остальных направлениях неизменным. Рассмотрим уравнения движения в результате преобразования координат. Для этого введем новые координаты, связанные со старыми следующими соотношениями: $t_1 = t$; $\theta_1 = \theta$; $\lambda_1 = \lambda$; $\xi_1 = \xi - h(\theta, \lambda)$.

Выражения градиента массовых сил в новой системе координат имеет вид:

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial S}-\frac{\partial\Phi}{\partial S}=-\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial S_1}\right)_h+\int_0^{\xi_1}\left(R\gamma_v\frac{\partial\ln P}{\partial S_1}-g\frac{\partial\ln T_v}{\partial S_1}\right)d\xi_1'-\gamma_0\frac{\partial h}{\partial S_1}-\frac{\partial\gamma_h}{\partial S_1}.$$

Следовательно, применение «выпрямленных» координат вводит в уравнение дополнительный член, учитывающий орографию. Хотя это слагаемое велико, но оно компенсируется в значительной степени барическим градиентом, взятым вдоль земной поверхности. Таким образом, уравнения горизонтального

движения можно окончательно представить в следующем виде (используются сферические координаты θ, λ):

$$\frac{dU_1}{dt_1} - \frac{U_1 V_1}{a}\operatorname{ctg}\theta - lV_1 = -\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial P_1}{\partial x_1}\right)_h - \gamma_0 \frac{\partial h}{\partial x_1} - \frac{\partial \phi_h}{\partial x_1} + \int_0^{\xi_1}\left(R\gamma_v \frac{\partial \ln P_1}{\partial x_1} - g\frac{\partial \ln T_{v_1}}{\partial x_1}\right)d\xi_1'; \quad (2.13)$$

$$\frac{dV_1}{dt_1} - \frac{U_1^2}{a}\operatorname{ctg}\theta - lU_1 = -\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial P_1}{\partial y_1}\right)_h - \gamma_0 \frac{\partial h}{\partial y_1} - \frac{\partial \phi_h}{\partial y_1} + \int_0^{\xi_1}\left(R\gamma_v \frac{\partial \ln P_1}{\partial y_1} - g\frac{\partial \ln T_{v_1}}{\partial y_1}\right)d\xi_1', \quad (2.14)$$

где $\frac{d}{dt_1} = \frac{\partial}{\partial t_1} + U_1\frac{\partial}{\partial x_1} + V_1\frac{\partial}{\partial y_1} + \tilde{W}\frac{\partial}{\partial \xi_1}$; $\partial x_1 = a\sin\theta\partial\lambda$; $\partial y_1 = a\partial\theta$;

$$\tilde{W}_1 = \frac{d\xi_1}{dt} = W - U\frac{\partial h}{\partial x} - V\frac{\partial h}{\partial y}.$$

2.1.3. Уравнения баланса влаги в атмосфере

Рассмотрим двухфазную среду (гидромеханики многофазных сред [43, 61]), состоящую из влажного воздуха, имеющего плотность ρ, и водных капель, содержание которых будем оценивать удельной водностью δ. Введем для двухфазной среды плотность $\tilde{\rho}$ и имеем соотношение

$$\tilde{\rho} = \rho(1+\delta). \quad (2.15)$$

В облачной фазе различают две группы капель (две компоненты). Первая группа содержит капли крупных размеров (гидрометеоры), которые не вовлекаются целиком восходящим потоком и имеют значительную скорость оседания $\tilde{V}_k$, удельная водность этой группы капель δ_k, определяемое как отношение плотности крупных капель к плотности влажного воздуха. Во вторую группу войдут мелкие капли, которые полностью вовлекается основным потоком. Таким образом, облачная среда во влажном воздухе представляет собой гетерогенную или многофазную смесь (в данном случае трехфазную). В гетерогенной смеси каждая фаза имеет лишь часть объема смеси, вследствие чего полный объем $\tilde{V}$ равен $\tilde{V} = V + V_m + V_k$.

Кроме того, температура, скорость, давление, энергия, плотность удовлетворяют условию аддитивности по плотностям фаз. Рассмотрим гетерогенную смесь в виде совокупности трех фаз заполняющих один и тот же объем. В результате в каждой точке пространства, занятого смесью, можно ввести средние плотности ρ, ρ_m, ρ_k характеризующие массу фазы в единице объема смеси, средние скорости движения фаз V_b, V_m, V_k и т.д., а также выписать уравнения сохранения массы, моментов и энергии для каждой составляющей смеси, куда будут включены члены, описывающие межфазовые взаимодействия (массовые, силовые и энергетические). В облачной среде, состоящей из двух компонент, проходят процессы оседания, коагуляции, динамического слияния и испарения. Обозначим через V_k скорость движения крупных капель, V – осредненная по массе скорость движения всей среды, то скорость оседания или диффузии этой фазы $\tilde{V}_k$ будет равна [61, 92]:

$$\tilde{V}_k = V_k - V = \frac{\rho + \rho_m}{\rho_k}(V_k - V_b), \quad (2.16)$$

а уравнение неразрывности примет вид:

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + div \rho_k V_k = I_k, \tag{2.17}$$

где I, I_m – отнесенная к единице массы скорость прироста соответствующей фазы (влажного воздуха и мелких капель) за счет микрофизических процессов. Поток V характеризует движение всей смеси. При рассмотрении крупных капель (гидрометеоров) следует учесть, что их скорость движения будет отличаться от скорости движения, например, мелких капель.

Или
$$\frac{\partial \delta_m}{\partial t} + V_b \cdot grad \delta_m = \frac{1}{\rho}\left(I_m - \delta_m I \right); \tag{2.18}$$

$$\frac{\partial \delta_k}{\partial t} + V_k \cdot grad \delta_k = -\frac{1}{\rho}\left[\delta_k div\left(\frac{\rho \delta_k}{1+\delta_m} \tilde{V}_k \right) + \delta_k I - I_k \right], \tag{2.19}$$

где
$$\delta_m = \frac{\rho_m}{\rho}; \quad \delta_k = \frac{\rho_k}{\rho}. \tag{2.20}$$

Выражения (2.18) и (2.19) – общие уравнения концентрации, описывающие баланс каждой компоненты облачной среды. Для двухкомпонентной облачной среды:

$$\frac{d\delta}{dt} = -\frac{1}{\rho} div\left(\frac{\delta_k \rho}{1+\delta_m} \tilde{V}_k \right) - \frac{1}{\rho}\left(\delta_k I - I_k - I_m + \delta_m I \right), \tag{2.21}$$

где $\delta = \delta_m + \delta_k$; $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V_b \cdot grad$.

Первый член в правой части описывает диффузию гидрометеоров за счет гравитационного оседания, а второй должен включать скорость конденсации и вовлечения. Второй член в (2.21) можно представить в виде:

$$-\frac{1}{\rho}\left(\delta_k I - I_k - I_m + \delta_m I \right) = \frac{dm^*}{dt} + \mu^* \left(m - m_0 + \delta_m \right). \tag{2.22}$$

В уравнении (2.18) правую часть запишем следующим образом:

$$-\frac{1}{\rho}\left(I_m - \delta_m I \right) = \frac{dm^*}{dt} + \mu^* \left(m - m_0 + \delta_m \right) - S_n^m - S_c^m - S_u^m. \tag{2.23}$$

Здесь первый член в правой части описывает количество водяного пара путем конденсации, переходящего в капельное состояние, второй – описывает изменения водности в результате вовлечения. S_n^m – установившийся процесс роста крупных капель за счет уменьшения мелких путем перекачки водяного пара от мелких к крупным каплям:

$$S_n^m = \begin{cases} -k(\delta_m - \delta_l) & \delta_m \geq \delta_l, \\ 0 & \delta_m < \delta_l, \end{cases}$$

где K – степень роста крупных или убывания мелких капель в единицу времени; δ_l – значение удельной водности, после достижения которой мелкие капли становятся гидрометеорами; S_c^m – изменение удельной водности за счет слияния.

По Кеслеру [257] эмпирическая зависимость:

$$S_c^m = -\delta_1 \delta_m \delta_k^{7/8}, \tag{2.24}$$

где δ_1 – параметр, описывающий собирательную способность капель и концентрацию собирающих крупных капель, $\delta_1 = 0{,}0052\rho^{-7/8}$. Для использования в крупномасштабных моделях можно положить приближенно:

$$S_c^m = -\delta_1 \delta_m \delta_k; \tag{2.25}$$

$$S_u^m = \alpha_1 \left(m^* - m \right), \tag{2.26}$$

где $\delta_1 \approx \dfrac{0{,}0022}{\rho(z)}$; α_1 – эмпирический параметр, описывающий скорость испарения мелких капель; S_u^k – испарение крупных капель.

Из (2.22) для крупных капель будем иметь:

$$-\frac{1}{\rho}(I_k - \delta_k I) = S_c^m + S_n^m + S_u^m.$$

Уравнение неразрывности для смеси влажного воздуха и облачной среды:

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + div \tilde{\rho} V = -\tilde{I}, \tag{2.27}$$

где $\tilde{I} = div\, \rho_k \tilde{V}_k$.

Если отсутствует процесс гравитационного оседания, то уравнение имеет вид:

$$\rho \frac{d\delta}{dt} + (1+\delta)\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + div \rho V \right) = -div \rho_k \tilde{V}_k; \tag{2.28}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div \rho V = -\frac{1}{1+\delta}\left[\rho \frac{dm^*}{dt} + \rho \mu^* (m - m_0 + \delta_m) - div\left(\frac{\rho \delta_k^2}{1+\delta_m} - \rho_k \right) \tilde{V}_k \right]. \tag{2.29}$$

Пологая, что диффузия гидрометеорной компоненты происходит только благодаря гравитационному оседанию, тогда:

$$div\left(\frac{\rho \delta_k^2}{1+\delta_m} - \rho_k \right) \tilde{V}_k \approx -\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\rho \delta_k^2 - \rho_k \right) \tilde{V}_k \right] = \frac{\partial \rho_k \tilde{V}_k}{\partial z}, \tag{2.30}$$

где $\tilde{V}_k$ – положительна и направлена к земле согласно [41].

$$\tilde{V}_k = V_\infty \left(1 - \alpha \exp\left(\beta \delta_k \right) \right), \tag{2.31}$$

где α, β – эмпирические параметры; V_∞ – предельная скорость оседания.

$$I = -\frac{\rho}{1+\delta}\left[\frac{dm^*}{dt} + \mu^* \left(m - m_0 + \delta_m \right) + \right.$$
$$\left. + \left(\frac{\beta}{2}\left(V_\infty - \tilde{V}_k \right) \frac{\partial \delta_k^2}{\partial z} - \left(\delta_k \tilde{V}_k \frac{\partial \ln \rho}{\partial z} + \tilde{V}_k \frac{\partial \delta_k}{\partial z} \right) \right) \right]. \tag{2.32}$$

Выпишем уравнения для отношения смеси:

$$\frac{d\ln(1+m)}{dt} = \frac{d\ln\left(1+m^*\right)}{dt} + S_u^m + S_u^k. \tag{2.33}$$

Берем уравнение неразрывности в следующем виде:

$$\frac{d\ln\rho}{dt} + divV - \alpha_3 \frac{d\ln\left(1+m^*\right)}{dt} = I^*, \tag{2.34}$$

где $-I^* = \frac{\mu^*}{1+\delta}\left(m - m_0 + \delta_m\right) + \frac{\frac{\beta}{2}\left(V_\infty - \tilde{V}_k\right)\frac{\partial\delta_k^2}{\partial z} - \tilde{V}_k\left(\delta_k\frac{\partial\ln\rho}{\partial z} - \frac{\partial\delta_k}{\partial z}\right)}{1+\delta}$;

$$\alpha_3 = \begin{cases} \dfrac{1+m^*}{1+\delta} & m \geq m^*; \\ 0 & m < m^*. \end{cases}$$

При отсутствии конденсации и вовлечения мы приходим к уравнению неразрывности без источников для влажного однородного воздуха

$$\frac{d\ln\rho}{dt} + divV = 0. \tag{2.35}$$

Горизонтальные компоненты скорости движения гидрометеоров совпадают с движением влажного воздуха и мелких капель облачной фазы, а вертикальная компонента скорости влажного воздуха и гидрометеоров различны. Фигурирующая в уравнениях средняя вертикальная скорость движения среды определяется как взвешенная по плотностям фаз и компонент вертикальная скорость. W_b вертикальная скорость движения мелкой компоненты облака и влажного воздуха, тогда средняя вертикальная скорость W будет равна:

$$W = \frac{\rho W_b + \rho_m W_b + \rho_k W_k}{\rho + \rho_m + \rho_k}.$$

2.1.4. Уравнения притока тепла

Для трехфазной смеси введем понятие динамического равновесия [61]. Это значит, что с точки зрения микроскопических процессов давление в каждой фазе быстро приспосабливается к некоторому общему давлению P и температуре T, что ни в коем случае нельзя принимать при явном рассмотрении конвективных процессов в атмосфере [92]. В макроскопическом приближении допускается, что в процессе конденсации выделяющееся тепло почти полностью отдается влажному воздуху. Это приводит к его нагреву по отношению к ненасыщенному воздуху и возникновению конвекции, при которой капли увлекаются потоком и осуществляется дополнительный адаптационный тепловой обмен между каплями

и окружающей средой. Учитывая вышесказанное, уравнение притока тепла для смеси возьмем в следующем виде:

$$\left(1+1{,}83m^*\right)\frac{d\ln T}{dt}-\frac{\chi-1}{\chi}\frac{d\ln P}{dt}=-\lambda^*\frac{dm^*}{dt}-\frac{L}{C_p}\frac{d}{dt}\left(\frac{m^*}{T}\right)+\frac{\tilde{\varepsilon}}{C_p}, \tag{2.36}$$

где $\lambda^*=\tilde{\lambda}+\dfrac{\tilde{L}_3}{C_pT}=\dfrac{\chi-1}{\chi}\dfrac{1}{1+m^*}\dfrac{1}{0{,}623-0{,}378m^*}+\dfrac{\tilde{L}_3}{C_pT}$;

$$\tilde{\varepsilon}=\varepsilon_R-\frac{\mu^*}{T}\left[C_p\left(T-T_0\right)+L\left(m-m_0\right)\right]-\frac{L_U+\tilde{L}_3}{T}\left(S_U^K+S_U^m\right)+$$
$$+\frac{\tilde{L}_3V_k}{T}\frac{\partial\ln(1+\delta_K)}{\partial Z}-\frac{\mu^*\tilde{L}_3}{T}\left(m-m_0+\delta_m\right), \tag{2.37}$$

где L – удельная теплота конденсации; C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; χ – отношение теплоемкостей; ε – внешние притоки тепла.

Первый член правой части описывает изменение энергии, идущее на нагревание воздушного пара, второй – дает вклад процессов конденсации, и наконец, ε включает все остальные виды энергии.

Рассмотрим наиболее существенные из них [79, 171, 178].

1. В облачных процессах происходит постоянное смещение облачной массы с порциями свежего ненасыщенного воздуха, приводящее к изменению характеристик облачной среды. Общее изменение притока тепла за счет смешения имеет вид:

$$\varepsilon_{\text{СМ}}=\frac{\mu^*}{T}\left[C_p\left(T-T_0\right)+L\left(m-m_0\right)\right], \tag{2.38}$$

где T_0, m_0 – температура и отношение смеси вовлекаемого, окружающего воздуха; μ^* – коэффициент вовлечения, определяющий количество массы вовлекаемого воздуха в единице облачной массы.

2. В области отрицательных температур, переохлажденные облачные капли, замерзая, передают облачной массе тепло

$$\varepsilon_3=\frac{L_3}{T}\cdot\frac{d\delta}{dt},$$

где L_3 – удельная теплота замерзания. Кроме того, в результате замерзания жидкой капли баланс влаги у ее поверхности изменится. Это приведет к некоторому накоплению тепла, равному

$$\varepsilon_\delta=\frac{L_k}{T}\Delta m^*\frac{d\delta}{dt},$$

где Δm^* – разность между отношениями смеси насыщения над водной поверхностью и надо льдом; L_k – удельная теплота конденсации. Объединяя эти два вида притока тепла, запишем:

$$\varepsilon_3=\frac{\tilde{L}_3}{T}\cdot\frac{d\delta}{dt}, \tag{2.39}$$

где $\tilde{L}_3=L_3+L_k\Delta m^*$.

3. В процессе облачной циркуляции облачная масса может переместиться в пространство, где $m_0 < m^*$. В этом случае часть капель будет испаряться, чтобы донасытить облачную смесь. Потеря тепла за счет этого явления равна:

$$\varepsilon_u = -\frac{L_u}{T}\left(S_u^k + S_u^m\right), \tag{2.40}$$

где L_u – удельная теплота испарения; $L_u S_u^k$ и S_u^m – соответственно количество испарившихся в единицу времени крупных и мелких капель.

4. В качестве четвертого вида необходимо рассматривать приток энергии за счет конвективного переноса тепла (ε_k) с нижних уровней при развитии проникающей конвекции. Реализация такой формы конвективной неустойчивости и ее параметризации придается сейчас большое внимание.

Выпишем теперь уравнение притока тепла, принимая во внимание три первых дополнительных вида притока тепла:

$$\left(1+1{,}83m^*\right)\frac{d\ln T}{dt} - \frac{\chi-1}{\chi}\frac{d\ln P}{dt} = -\lambda\frac{dm^*}{dt} - \frac{L}{C_p}\frac{d}{dt}\left(\frac{m^*}{T}\right) +$$

$$+\frac{1}{C_p}\left[\varepsilon_R - \mu^*\frac{C_P(T-T_0)+L\left(m-m_0\right)}{T} + \frac{\tilde{L}_3}{T}\left(S_u^m + S_u^k\right)\right],$$

где ε_R включает все оставшиеся виды энергии.

Используя соотношение для $d\delta/dt$ Б, уравнение притока тепла окончательно запишется в следующем виде:

$$\left(1+1{,}83m^*\right)\frac{d\ln T}{dt} - \frac{\chi-1}{\chi}\frac{d\ln P}{dt} = -\lambda^*\frac{dm^*}{dt} - \frac{L}{C_p}\frac{d}{dt}\left(\frac{m^*}{T}\right) + \frac{\tilde{\varepsilon}}{C_p}, \tag{2.41}$$

где $\lambda^* = \tilde{\lambda} + \frac{\tilde{L}_3}{C_p T} = \frac{\chi-1}{\chi}\frac{1}{1+m^*}\frac{1}{0{,}623-0{,}378m^*} + \frac{\tilde{L}_3}{C_p T}$;

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_R - \frac{\mu^*}{T}\left[C_p(T-T_0)+L(m-m_0)\right] - \frac{L_U+\tilde{L}_3}{T}\left(S_U^K + S_U^m\right) +$$

$$+\frac{\tilde{L}_3\tilde{V}_k}{T}\frac{\partial\ln(1+\delta_K)}{\partial Z} - \frac{\mu^*\tilde{L}_3}{T}\left(m-m_0+\delta_m\right).$$

Мы видим, что форма уравнения практически не изменилась по сравнению с (2.37). Изменилось лишь содержание внешнего притока тепла, куда вошли притоки за счет вовлечения, замерзания, испарения.

Необходимо вписать еще уравнение Клаузиуса-Клапейрона:

$$\frac{d\ln E}{dt} = \frac{L}{AR_nT}\frac{d\ln T}{dt}, \tag{2.42}$$

где A – термический эквивалент работы; R_n – газовая постоянная для водяного пара,

$$E = P\frac{m^*}{0{,}622+m^*}. \tag{2.43}$$

Уравнения состояния для влажного воздуха можно записать в виде:

$$P = \rho RT\left(1 - 0,622\frac{m}{1+m}\right) - \rho RT_V, \tag{2.44}$$

где T будет характеризовать температуру смеси. Если воздух насыщен, то следует положить $m = m^*$.

2.1.5. Учет в уравнениях движения неоднородности атмосферных сред

Рассмотрим движение неоднородных сред (движения влажного воздуха и мелкой компоненты, которая полностью вовлекается окружающим влажным воздухом с привлечением уравнения движения гидрометеорной части). В общем виде [43, 61] уравнения движения смеси влажного воздуха имеет вид:

$$\tilde{\rho}\frac{dV}{dt} = -gradP - 2\tilde{\rho}\vec{\omega}xV + \tilde{\rho}G - V\tilde{I} - div\left(\tilde{\rho}_K\tilde{V}_K\tilde{V}_K\right), \tag{2.45}$$

где последний член представляет собой дивергенцию от тензора $\tilde{T} = \tilde{V}_K\tilde{V}_K$, компоненты которого, в силу особенностей вектора $\tilde{V}_K$, будут отличны от нуля только для вертикальной компоненты скорости. Кроме этого члена в правой части появился дополнительный член, описывающий так называемую «реактивную» силу, связанную с процессами притока и стока массы во влажной атмосфере (в данном случае за счет гравитационного оседания гидрометеоров).

Поскольку $\tilde{V}_K$ с высотой убывает, то, видимо в большинстве случаев $\frac{\tilde{I}}{\tilde{\rho}} > 0$ и тогда дополнительный член в уравнениях движения облачной среды будет описывать эффект, подобный внутреннему трению. В результате такого механизма атмосферные вихри, охватывающие облачные скопления, теряют свою интенсивность благодаря эффекту гравитационного оседания гидрометеорной части облаков. Если же в облаке предполагается отсутствие гидрометеоров, то естественно, рассматриваемый дополнительный эффект равно нулю.

Конвективные движения крупных облачных скоплений, помимо термического воздействия, оказывают также динамические влияния на горизонтальные потоки. Введем корректировку уравнений для горизонтальных компонент скорости за счет конвективных движений [159].

Уравнение гидростатики (третье уравнения движения) запишем следующим образом:

$$\frac{\partial\overline{P}}{\partial Z} = -\overline{\tilde{\rho}}g - \overline{\tilde{\rho}\overset{0}{W}}. \tag{2.46}$$

Здесь черта означает операцию площадного осреднения, а $\tilde{\rho}$ – плотность облачной смеси. Последнее слагаемое запишем следующим образом:

$$\overline{\tilde{\rho}\overset{0}{W}} \approx \frac{\overline{\tilde{\rho}}}{2S_0}\frac{\partial}{\partial Z}\iint_{S_0}\mu W_C^2 dS_0' = \overline{\tilde{\rho}}\frac{\partial K}{\partial Z}, \tag{2.47}$$

где K – средневзвешенная по площади квадрата; S_0 – кинетическая энергия вертикальных конвективных движений; μ – функция распределения кучевых облаков внутри квадрата.

Обратимся теперь к уравнениям горизонтального движения. При нахождении градиента массовых сил учтем (2.46) и (2.47):

$$\Phi = \Phi_0 + \int_0^Z g dZ' = -\int_0^Z \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial Z} dZ' - K_Z + K_0.$$

Подставляя это выражение в уравнение горизонтального движения, пологая, что $K_0 = 0$, получим в уравнениях (2.13) и (2.14) дополнительные члены, учитывающие параметрические крупномасштабные очаги конвекции. В первом уравнении это $\partial K / \partial x$, а во втором $\partial K / \partial y$.

Чтобы проанализировать, какой эффект оказывает присутствие этих дополнительных членов, предположим, что имеется изолированное скопление мощных кучевых облаков, находящееся в безградиентном барическом и термическом полях. Пренебрегая, ускорениями в уравнениях движения имеем

$$\ell V_C = -\frac{\partial K}{\partial x}; \qquad (2.48)$$

$$\ell U_C = \frac{\partial K}{\partial y}.$$

Из этих соотношений следует, что наличие больших вертикальных движений в кучевых облаках облачных скоплений мгновенно создают крупномасштабную циклоническую циркуляцию, которая «закручивает» облачное скопление, образуя характерную форму циклонического облачного вихря.

Вертикальные конвективные движения, необходимые для расчета K, вычисляются методом слоя или частиц по данным температуры и влажности. Для использования механизма «закручивания» в синоптической практике необходима предварительная статическая проработка большого объема материала, чтобы связать конвективные W_C, вычисленные по единичным аэрологическим зондам, размер облачных скоплений, его форму с фактом возникновения облачного вихря, временем его формирования.

2.2. Исследование бароклинных процессов в сжимаемой атмосфере

Давление и температура является основными параметрами, определяющими общее состояние атмосферы. Другие метеорологические параметры, такие как влажность воздуха, внешние притоки тепла, а также процессы, связанные с ними, оказывают существенное воздействие на основное состояние атмосферы (давление, температура, ветер).

Качество численных прогнозов существенно зависит от полноты исходной информации и пространственного разрешения моделей. Преодоление этих трудностей целиком зависит от имеющихся технических возможностей наблюдательных систем и вычислительной техники. Одной из нерешенных проблем является корректный учет в моделях условий на нижней и верхней границе атмосферы. В какой-то степени она решается использованием σ – системы координат.

Улучшение качества прогнозов может быть получено благодаря введению влажности при определении барического градиента в уравнениях движения.

А отсюда вытекает необходимость учета влажности и ее фазовых переходов при расчете полей вертикальных движений, давления и температуры. Выведен уравнения для полной производной от давления и температуры и показано, что для прогноза давления можно строит модель, базирующуюся на использовании уравнения для неполной производной от давления, решение которой зависит от вертикального распределения плоской дивергенции, горизонтальной бароклинности и внешних притоков тепла. Совместное рассмотрение этого уравнения с уравнением движения (подраздел 1) представляет собой основу численной модели прогноза метеорологических элементов.

Важным фактором, играющим большую роль в динамике бароклинных преобразований, являются внешние притоки тепла. Их роль особенно возрастает при увеличении временного масштаба процессов, что имеет место при долгосрочном прогнозировании.

Из физических, принципиальных проблем следует отметить проблему учета планетарного пограничного слоя и взаимосвязь разномасштабных атмосферных процессов (конвекция, термодинамика океана, микрофизические явления в облаках, радиационные процессы в реальной, облачной атмосфере и др.).

К этому циклу исследований также следует отнести интересные прогностические эксперименты Гамбо [131] и Кришнамурти [138], им удалось наглядно показать существенную роль процессов конденсации и конвективной неустойчивости на крупномасштабный циклогенез.

Рассмотрим атмосферу в состоянии насыщения. К условиям ненасыщенной атмосферы можно будет перейти путем простого стремления к нулю некоторых параметров. Уравнения для полной производной от давления и температуры будут в дальнейшем использованы при построении уравнения для вертикальной скорости и прогностического уравнения поля давления и температуры. Кроме того, рассматриваемые в этом параграфе уравнения могут быть использованы для модели прогноза в изобарической системе координат с учетом наличия конденсационных слоев.

2.2.1. Уравнение для полной производной от давления и температуры в насыщенной атмосфере

Возьмем полную производную от прологарифмированного уравнения состояния, после элементарных выкладок и, разрешая относительно производной от давления и температуры, придем к системе уравнений:

$$\frac{d\ln P}{dt} = -\chi\left(\varphi_1 divV - \varphi_2 \frac{\varepsilon_1}{C_P}\right); \tag{2.49}$$

$$\frac{d\ln T}{dt} = -(\chi - 1)\left(\varphi_3 divV\right) + \chi\varphi_4 \frac{\varepsilon_2}{C_P}, \tag{2.50}$$

где $\lambda_1 = 1 + b\dfrac{m^*}{1+m^*}$; $\lambda_2 = 1 + b\dfrac{m^*}{1+m^*}\dfrac{L}{AR_n T}$; $b = 0,622\dfrac{1+1,606m^*}{1+1,622m^*} + \alpha_3\left(1+606m^*\right)$;

$$\lambda_3 = 1 + 1{,}83m^* + \lambda^* m^* \left(1 + 1{,}6m^*\right) \frac{L}{AR_n T} -$$

$$- \frac{Lm^*}{C_P T} \left[\left(1 + 1{,}6m^*\right) \frac{L}{AR_n T} - 1 \right];$$

$$\lambda_4 = \frac{\chi - 1}{\chi} + \lambda^* m^* \left(1 + 1{,}6m^*\right) + \frac{Lm^*}{C_P T} \left(1 + 1{,}6m^*\right); \quad \varphi_1 = \frac{\lambda_3}{\chi\lambda}; \quad \varphi_2 = \frac{\lambda_2}{\chi\lambda}; \quad \varphi_{3Б} = \frac{\lambda_4}{(\chi - 1)\lambda};$$

$$\varphi_4 = \frac{\lambda_1}{\chi\lambda}; \quad \lambda = \lambda_1\lambda_3 - \lambda_2\lambda_4; \quad \varepsilon_1 = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} C_P I^* - \tilde{\varepsilon}; \quad \varepsilon_2 = \tilde{\varepsilon} - \frac{\chi - 1}{\chi} C_P \frac{\varphi_3}{\varphi_4} I^*.$$

Уравнения для давления и температуры в такой форме для адиабатической, сухой атмосферы рассматривались в [44, 57].

Квазигидростатическое приближение предусматривает пренебрежение вертикальным ускорением в третьем уравнении движения, и рассмотрим уравнение неразрывности в форме

$$\frac{d \ln \rho}{dt} = -D - \frac{\partial W}{\partial Z} + \frac{\alpha_3}{1 + m^*} \frac{dm^*}{dt} + I^*, \tag{2.51}$$

где $D = \dfrac{\partial U}{\partial x} + \dfrac{\partial V}{\partial y}$, и уравнение квазистатики в следующем виде:

$$\frac{\partial \ln P}{\partial Z} = -g \frac{\rho}{P}.$$

Возьмем теперь полную производную от обеих частей уравнения и получим следующее уравнение для полной производной от давления:

$$\frac{\partial}{\partial Z}\left(\frac{d \ln P}{dt}\right) + \mu \frac{\partial \ln P}{\partial Z} \frac{d \ln P}{dt} = B - \frac{\partial \ln P}{\partial Z}\left(D + I^* - \nu \frac{\tilde{\varepsilon}}{C_P}\right) \equiv F(z), \tag{2.52}$$

где

$$\mu = 1 - \alpha_3 \frac{m^*}{1 + m^*}\left(1 + 1{,}6m^*\right)\left(\frac{L}{AR_n T} \frac{\lambda_4}{\lambda_3} - 1\right);$$

$$\nu = \alpha_3 \frac{m^*}{1 + m^*}\left(1 + 1{,}6m^*\right) \frac{\lambda_3 L}{AR_n T};$$

$$B = \frac{\partial U}{\partial Z} \frac{\partial \ln P}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial Z} \frac{\partial \ln P}{\partial y};$$

T_V – виртуальная температура.

Для безоблачной атмосферы ($\mu = 1$, $\nu = 0$) следует из (2.52):

$$\frac{\partial}{\partial Z}\left(\frac{dP}{dt}\right) = PB - \frac{\partial P}{\partial Z} D. \tag{2.53}$$

Уравнение (2.52) используется для определения $\frac{dP}{dt}$ путем обычной квадратуры, удовлетворяя краевому условию на бесконечности, где $\frac{dP}{dt} = 0$.

Переход в (2.53) к изобарической системе координат дает общеизвестное уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \omega}{\partial P} = -D_P,$$

где $\omega = \frac{dP}{dt}$.

За счет μ происходит в процессе конденсации увеличение изменения давления в среднем на 5 %, если учесть убывание с высотой μ.

Оценки показывают, что все виды вкладов притоков тепла сравнимы с вкладом плоской дивергенции. Имея в виду, что $v \approx 0{,}2$, можно грубо оценить вклад притока тепла в облачном слое величиною, оцениваемой в 10–20 % от вклада дивергенции.

2.2.2. Прогностические уравнения для сглаженных значений метеорологических элементов в сжимаемой атмосфере

Рассмотрим уравнения гидротермодинамики сжимаемой атмосферы для сглаженных величин с использованием гипотезы о линейной связи между одноточечными моментами и осредненными характеристиками движения.

Рассмотрим систему уравнений гидротермодинамики для сжимаемой атмосферы в виде [22]:

$$\frac{dU}{dt} - 2\omega \cos\tilde{\theta} V = -RT_V \frac{\partial \ln P}{\partial x}; \tag{2.54}$$

$$\frac{dV}{dt} + 2\omega \cos\tilde{\theta} U = -RT_V \frac{\partial \ln P}{\partial y}; \tag{2.55}$$

$$\frac{d \ln P}{dt} = -\chi \varphi_1 div V + \chi \varphi_2 \frac{\varepsilon_1}{C_P}; \tag{2.56}$$

$$\frac{d \ln T}{dt} = -(\chi - 1)\varphi_3 div V + \chi \varphi_4 \frac{\varepsilon_2}{C_P}; \tag{2.57}$$

$$\frac{\partial \ln P}{\partial Z} = -\frac{g}{RT_V}, \tag{2.58}$$

где U, V, W – компоненты скорости на оси координат x, y, z; $\tilde{\theta}$ – дополнение до географической широты; ω – угловая скорость вращения Земли.

Пусть $\varphi_1 = \overline{\varphi}_1 + \varphi_1'$; $\varphi_3 = \overline{\varphi}_3 + \varphi_3'$, где $\overline{\varphi}_1$ и $\overline{\varphi}_3$ суть постоянных величин.

Видоизменим уравнения (2.67), (2.68), введя вместо P и T функции π и θ: $\pi = \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{1}{\chi \overline{\varphi}_1}}$; $\theta = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{\overline{\varphi}_3 (\chi - 1)}}$ (T_0, P_0 – константы, имеющие размерности соответственно температуры и давления).

Тогда $\frac{d\ln T}{dt} = \overline{\varphi}_3(\chi - 1)\frac{d\ln\theta}{dt}$ и $\frac{d\ln P}{dt} = \chi\overline{\varphi}_1\frac{d\ln\pi}{dt}$.

И, следовательно,

$$\frac{\partial\pi}{\partial t} + \frac{\partial U\pi}{\partial x} + \frac{\partial V\pi}{\partial y} + \frac{\partial W\pi}{\partial z} = -\pi\left(\frac{\varphi_1}{\overline{\varphi}_1} - 1\right)divV - \frac{\pi\varphi_2\varepsilon_1}{\overline{\varphi}_1 C_P}; \tag{2.59}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} + \frac{\partial U\theta}{\partial x} + \frac{\partial V\theta}{\partial y} + \frac{\partial W\theta}{\partial z} = -\theta\left(\frac{\varphi_3}{\overline{\varphi}_3} - 1\right)divV - \frac{\chi\theta\varphi_4\varepsilon_2}{(\chi - 1)\varphi_3 C_P}. \tag{2.60}$$

Правые части этих уравнений обращаются в ноль в адиабатической атмосфере и было бы более удобным ввести вместо π и θ потенциальную температуру и затем уравнение для последней свести к дивергентной форме.

Имея, что

$$RT\frac{\partial\ln P}{\partial S} = \chi\overline{\varphi}_1 RT\frac{\partial\ln\pi}{\partial S} = C^2\theta^{(\chi-1)\overline{\varphi}_3}\frac{\partial\ln\pi}{\partial S},$$

где $S = (x, y)$, $C^2 = \chi\overline{\varphi}_1 RT_0$, уравнения движения примут вид:

$$\frac{dU}{dt} - 2\omega\cos\tilde{\theta}V = -C^2\theta^{(\chi-1)\overline{\varphi}_3}\frac{\partial\ln\pi}{\partial x}; \tag{2.61}$$

$$\frac{dV}{dt} + 2\omega\cos\tilde{\theta}U = -C^2\theta^{(\chi-1)\overline{\varphi}_3}\frac{\partial\ln\pi}{\partial y}; \tag{2.62}$$

$$C^2\theta^{(\chi-1)\overline{\varphi}_3}\frac{\partial\ln\pi}{\partial z} = -g. \tag{2.63}$$

Введем осредненные по времени характеристики $\overline{U}$, $\overline{V}$, $\overline{W}$, $\overline{\theta}$, $\overline{\pi}$, $\overline{\varepsilon}$ связанные с мгновенными величинами соотношениями:

$$U = \overline{U} + U'; \quad V = \overline{V} + V'; \quad W = \overline{W} + W'; \quad \theta = \overline{\theta} + \theta'; \quad \pi = \overline{\pi} + \pi'; \quad \varepsilon = \overline{\varepsilon} + \varepsilon',$$

где штрихами обозначены отклонения от осредненного состояния.

Используя рейнольдсовские постулаты осреднения и применив операцию осреднения, получим:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\overline{\pi}}{\partial t} + \frac{\partial\overline{U}\overline{\pi}}{\partial x} + \frac{\partial\overline{V}\overline{\pi}}{\partial y} + \frac{\partial\overline{W}\overline{\pi}}{\partial z} + \frac{\partial\overline{U'\pi'}}{\partial x} + \frac{\partial\overline{U'\pi'}}{\partial y} + \frac{\partial\overline{W'\pi'}}{\partial z} = \\ &= \overline{\pi}\left(\frac{\overline{\varphi}_2}{\overline{\varphi}_1}\frac{\overline{\varepsilon}_1}{C_P} + \frac{\overline{\varphi_1' divV'}}{\overline{\varphi}'} + \frac{\overline{\varphi_2'\varepsilon_1'}}{C_P\overline{\varphi}_1}\right) - divV\frac{\overline{\pi'\varphi_1'}}{\overline{\varphi}_1} + \frac{\overline{\varphi}_2}{\overline{\varphi}_1}\frac{\overline{\pi'\varepsilon_1'}}{C_P} + \frac{\overline{\pi'\varphi_2'}}{\overline{\varphi}_1}\frac{\overline{\varepsilon}_1}{C_P};\end{aligned} \tag{2.64}$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\overline{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial\overline{U}\overline{\theta}}{\partial x} + \frac{\partial\overline{V}\overline{\theta}}{\partial y} + \frac{\partial\overline{W}\overline{\theta}}{\partial z} + \frac{\partial\overline{U'\theta'}}{\partial x} + \frac{\partial\overline{V'\theta'}}{\partial y} + \frac{\partial\overline{W'\theta'}}{\partial z} = \\ &= \overline{\theta}\frac{\chi\overline{\varphi}_4\overline{\varepsilon}_2}{(\chi - 1)\overline{\varphi}_3 C_P} - \left(\frac{\overline{\theta'\varphi_3'}}{\overline{\varphi}_3}\right)divV + \frac{\chi}{(\chi - 1)}\left(\frac{\overline{\varphi}_4}{\overline{\varphi}_3}\frac{\overline{\theta'\varepsilon_2'}}{C_P} + \frac{\overline{\theta'\varphi_4'}}{\overline{\varphi}_3}\frac{\overline{\varepsilon}_2}{C_P}\right).\end{aligned} \tag{2.65}$$

Последние три члена в левых частях представляют собой дивергенцию турбулентных потоков энергии и тепла, обусловленные пульсациями давления и температуры. Воспользуемся гипотезой о линейной зависимости между векторами турбулентных потоков по осям координат и осредненными характеристиками [55] и запишем формально:

$$\overline{U'\pi'} = -K_\pi \frac{\partial \overline{\pi}}{\partial x}; \quad \overline{U'\theta'} = -K_\theta \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x};$$

$$\overline{W'\pi'} = -K_\pi^* \left(\frac{\partial \overline{\pi}}{\partial Z} - \frac{\partial \pi_0}{\partial Z} \right); \quad \overline{W'\theta'} = -K_\theta^* \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z} - \frac{\partial \theta_0}{\partial Z} \right) \text{ и т.д.} \tag{2.66}$$

где π_0, θ_0 – стандартные значения π и θ; K_π, K_θ, K_π^*, K_θ^* – коэффициенты турбулентности, которые сами в свою очередь зависят от характеристик осредненного движения.

В этом смысле рассматриваемая система не является замкнутой и требуется, как известно, привлечь еще какие либо дополнительные гипотезы относительно поведения коэффициентов турбулентности. Используя (2.66), уравнения (2.64), (2.65) можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial \overline{\pi}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{U}\overline{\pi}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V}\overline{\pi}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{W}\overline{\pi}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} K_\pi \frac{\partial \overline{\pi}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_\pi \frac{\partial \overline{\pi}}{\partial y} + \\ + \frac{\partial}{\partial z} K_\pi \left(\frac{\partial \overline{\pi}}{\partial z} - \frac{\partial \pi_0}{\partial z} \right) - \overline{\pi} \left(\frac{\overline{\varphi}_2}{\overline{\varphi}_1} \frac{\overline{\varepsilon}_1}{C_P} \right) + S_\pi; \tag{2.67}$$

$$\frac{\partial \overline{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{U}\overline{\theta}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V}\overline{\theta}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{W}\overline{\theta}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} K_\theta \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_\theta \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial y} + \\ + \frac{\partial}{\partial z} K_\theta \left(\frac{\partial \overline{\theta}}{\partial z} - \frac{\partial \theta_0}{\partial z} \right) + \overline{\theta} \frac{\chi}{\chi - 1} \left(\frac{\overline{\varphi}_4}{\overline{\varphi}_3} \frac{\overline{\varepsilon}_2}{C_P} \right) + S_\theta, \tag{2.68}$$

где S_π, S_θ содержат все оставшиеся члены.

Не останавливаясь на физических свойствах характеристик S_π, S_θ, предполагая, что они в первом приближении могут быть опущены ввиду очевидной относительной малости.

Уравнения (2.67), (2.68) дополним соображениями, определяющими коэффициенты K_π, K_θ. Для крупномасштабных процессов допустимо предположение [50], что $K_\pi = \text{const}$, $K_\theta = \text{const}$ и, согласно закону Ричардсона-Обухова, пропорциональны $e^{1/3} L^{4/3}$, где e – средняя для всей атмосферы диссипация кинетической энергии (5 эрг/г·с) (L – масштаб возмущений).

В результате получим:

$$\frac{\partial \overline{\pi}}{\partial t} + \overline{U} \frac{\partial \overline{\pi}}{\partial x} + \overline{V} \frac{\partial \overline{\pi}}{\partial y} + \overline{W} \frac{\partial \overline{\pi}}{\partial z} = \\ = K_\pi \Delta \overline{\pi} + \frac{\partial}{\partial z} K_\pi^* \left(\frac{\partial \overline{\pi}}{\partial z} - \frac{\partial \pi_0}{\partial z} \right) + \overline{\pi} \left(div \overline{V} - \frac{\overline{\varphi}_2}{\overline{\varphi}_1} \frac{\overline{\varepsilon}_1}{C_P} \right); \tag{2.69}$$

$$\frac{\partial\overline{\theta}}{\partial t}+\overline{U}\frac{\partial\overline{\theta}}{\partial x}+\overline{V}\frac{\partial\overline{\theta}}{\partial y}+\overline{W}\frac{\partial\overline{\theta}}{\partial z}=$$
$$=K_0\Delta\overline{\theta}+\frac{\partial}{\partial z}K_0^*\left(\frac{\partial\overline{\theta}}{\partial z}-\frac{\partial\theta_0}{\partial z}\right)+\overline{\theta}\left(\frac{\chi}{\chi-1}\left(\frac{\overline{\varphi}_4}{\overline{\varphi}_3}\frac{\overline{\varepsilon}_2}{C_P}\right)-div\overline{V}\right). \tag{2.70}$$

Перейдем теперь к рассмотрению уравнений движения. Умножим (2.61) на π, а (2.59) на U и сложим эти два уравнения. После применения операции осреднения и введения линейной гипотезы для напряжений, получим:

$$\frac{d\overline{U}}{dt}-l\overline{V}-C^2\theta^{(\chi-1)\varphi_3}\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial x}=K_\pi\Delta\overline{U}+\frac{\partial}{\partial z}K_Z\frac{\partial\overline{U}}{\partial z}-K\frac{\partial}{\partial x}div\overline{V}-Kl\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial y}+$$
$$+K\frac{\partial\overline{U}}{\partial x}\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial x}+2K\frac{\partial\overline{U}}{\partial y}\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial y}+2K\frac{\partial\overline{U}}{\partial z}\left(\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial z}-\frac{1}{2\pi}\frac{\partial\pi_0}{\partial z}\right)-K\frac{\partial\overline{V}}{\partial z}\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial y}- \tag{2.71}$$
$$-K\frac{\partial\overline{W}}{\partial x}\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial z}+K\frac{\partial}{\partial x}\left(K\Delta\overline{\pi}+\frac{\partial}{\partial z}K_Z\frac{\partial\overline{\pi}}{\partial z}\right)-\frac{T_x}{\overline{\pi}};$$

$$\frac{dV}{dt}+lU+C^2\theta^{(\chi-1)\varphi_3}\frac{\partial\ln\pi}{\partial y}=K\Delta U+\frac{\partial}{\partial z}K_Z\frac{\partial V}{\partial z}-K\frac{\partial}{\partial y}divV-lK\frac{\partial\ln\pi}{\partial x}+$$
$$+2K\frac{\partial V}{\partial x}\frac{\partial\ln\pi}{\partial x}+K\frac{\partial V}{\partial y}\frac{\partial\ln\pi}{\partial y}-2K_Z\frac{\partial V}{\partial z}\left(\frac{\partial\ln\pi}{\partial z}-\frac{1}{2\pi}\frac{\partial\pi_0}{\partial z}\right)-K\frac{\partial U}{\partial x}\frac{\partial\ln\pi}{\partial y}- \tag{2.72}$$
$$-K\frac{\partial W}{\partial y}\frac{\partial\ln\pi}{\partial z}+K\frac{\partial}{\partial z}\left(K\Delta\pi+\frac{\partial}{\partial z}K_Z\frac{\partial\pi}{\partial z}\right)-\frac{T_y}{\pi}.$$

Первые два члена правых частей обычно входят в уравнения при условии несжимаемости атмосферы. Все остальные слагаемые появились благодаря учету сжимаемости. Здесь введены безразмерные параметры:

$$\mathrm{Re}=\frac{K}{UL};\quad Ki=\frac{lL}{C};\quad Ma=\frac{U}{C};\quad Fr=\frac{C^2}{gH};\quad \beta=\frac{K_Z}{K};\quad \alpha=\frac{L}{H};\quad \gamma=\frac{W}{U}.$$

Уравнения (2.71), (2.72), (2.58), (2.69), (2.70) при заданных внешних радиационных притоках тепла и соответствующих начальных и краевых условиях служат системой для определения осредненных метеорологических элементов.

2.2.3. Вывод уравнений для изменения давления применительно к сглаженным величинам во влажной атмосфере

Мы рассматриваем общий случай, предусматривающий наличие процессов конденсации. При отсутствии конденсации формулы автоматически переходят к виду для влажной атмосферы. После несложных преобразований получим первое необходимое нам уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{dn\ln\overline{\pi}}{dt}\right)+b_1\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial z}\frac{dn\ln\overline{\pi}}{dt}+\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial z}b_2\overline{W}=B_1-\chi\overline{\varphi}_4\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial z}\frac{\overline{\varepsilon}_2}{C_P}+$$
$$+\overline{\varphi}_3\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial z}\frac{\overline{\varepsilon}_\pi}{C_P}-b_3\frac{dn\ln\overline{\pi}}{dz}\frac{\tilde{\varepsilon}}{C_P}+(\chi-1)\frac{\overline{\varphi}_2\overline{\varphi}_3}{\overline{\varphi}_1}\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial z}\frac{\overline{\varepsilon}_1}{C_P}-\frac{a_3\overline{\varepsilon}_\theta+a_4\overline{\varepsilon}_m}{C_P}\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial z}. \tag{2.73}$$

В качестве второго уравнения используется уравнение:

$$\frac{dn\ln\overline{\pi}}{\partial t}+\overline{W}\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial t}-\frac{\partial\overline{W}}{\partial z}=-D+\frac{\overline{\varphi}_{21}}{\overline{\varphi}_1}\frac{\overline{\varepsilon}}{C_P}+\frac{\overline{\varepsilon}_\pi}{C_P}; \tag{2.74}$$

где $\dfrac{\overline{\varepsilon}_\theta}{C_P}=\dfrac{1}{\overline{\theta}}\left(K\Delta\overline{\theta}+\dfrac{\partial}{\partial z}K_\theta\dfrac{\partial\overline{\theta}}{\partial z}\right)$; $\dfrac{\overline{\varepsilon}_m}{C_P}=\dfrac{1}{1+\overline{m}^*}\left(K\Delta\overline{m}^*+\dfrac{\partial}{\partial z}K_m\dfrac{\partial\overline{m}^*}{\partial z}\right)$;

$$b_1=(\chi-1)\overline{\varphi}_3+a_1=(\chi-1)\overline{\varphi}_3+\alpha_3\frac{0{,}6\overline{m}^*}{1+\overline{m}^*}\left(\frac{L}{AR_nT}\frac{\lambda_4}{\lambda_3}-1\right)\chi\overline{\varphi}_1;$$

$$b_2=(\chi-1)\overline{\varphi}_3\left[\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial z}-\frac{\partial\ln\overline{\theta}}{\partial z}+\alpha_3\frac{0{,}6\chi\overline{m}^*\overline{\varphi}_1}{(\chi-1)\left(1+\overline{m}^*\right)\overline{\varphi}_3}\left(\frac{L}{AR_nT}\frac{\lambda_4}{\lambda_3}-1\right)\frac{\partial\ln\overline{\pi}}{\partial z}-\right.$$
$$\left.-\frac{0{,}6}{1+1{,}6\overline{m}^*}\frac{\partial\ln\left(1+\overline{m}^*\right)}{\partial z}\right];$$

$$b_3=\alpha_3\frac{0{,}6\overline{m}^*}{1+\overline{m}^*}\left(\frac{\lambda_3L}{AR_nT}\right);\quad a_3=(\chi-1)\overline{\varphi}_3^{\,*}\quad a_4=\frac{0{,}6\overline{m}^*}{\left(1+\overline{m}^*\right)\left(1+1{,}6\overline{m}^*\right)};$$

$$\overline{D}=\frac{\partial\overline{U}}{\partial x}+\frac{\partial\overline{V}}{\partial y};\quad \frac{\overline{\varepsilon}_\pi}{C_P}=\frac{1}{\overline{\pi}}\left(K\Delta\overline{\pi}+\frac{\partial}{\partial z}K_\pi\frac{\partial\overline{\pi}}{\partial z}\right).$$

Полученные уравнения могут быть использованы для определения величины $\dfrac{dn\ln\overline{\pi}}{dt}$ или $\overline{W}$. Поскольку уравнения содержат переменные коэффициенты, то они могут быть решены только численно.

Эта система требует двух краевых условий:

$$\overline{W}=\overline{W}_0(x,y)\text{ при }z=0;\ \overline{P}\frac{dn\ln\overline{\pi}}{dt}\to 0\text{ при }z\to\infty.$$

В правой части (2.74) имеются члены, описывающие турбулентную диффузию механической энергии $\dfrac{\overline{\varepsilon}_\pi}{C_P}=\dfrac{1}{\pi}\left(K\Delta\pi+\dfrac{\partial}{\partial z}K_\pi\dfrac{\partial\pi}{\partial z}\right)$ и турбулентную диффузию водяного пара $\dfrac{\varepsilon_m}{C_P}=\dfrac{1}{1+m}\left(K\Delta m+\dfrac{\partial}{\partial z}K_m\dfrac{\partial m}{\partial z}\right)$.

2.2.4. Уравнение для неадвективных изменений давления при отсутствии конденсации. Оценка роли турбулентной диффузии

Уравнения предыдущего параграфа можно автоматически трансформировать для случая влажной, но не конденсированной, сжимаемой атмосферы. Для этого необходимо положить всюду $\varphi_i = 1$, $\alpha_3 = 0$.

После несложных преобразований придем к следующей системе двух уравнений:

$$\frac{\partial\Gamma}{\partial z}-\frac{1}{\chi}\frac{\partial\ln P}{\partial z}\Gamma-\alpha\overline{W}=B-\frac{\partial P}{\partial z}\tilde{\varepsilon}^{(1)};$$

$$\frac{\partial \overline{W}}{\partial z} + \alpha \overline{W} - \frac{1}{\chi}\frac{\partial \ln P}{\partial z}\Gamma = \frac{\partial P}{\partial z}D - \frac{\partial P}{\partial z}\left(\frac{\tilde{\varepsilon}_2^{(2)} + \varepsilon_\pi}{C_P}\right), \tag{2.75}$$

где были введены обозначения

$$\tilde{\varepsilon}^{(1)} = \left(\frac{\tilde{\varepsilon} + (\chi - 1)\varepsilon_\pi - (\chi - 1)\varepsilon_\theta - a_4\varepsilon_m}{C_P}\right);$$

$$\tilde{\varepsilon}_2 = \left(\frac{\tilde{\varepsilon} + \varepsilon_\pi}{C_P}\right); \quad B = \frac{\partial U}{\partial z}\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial z}\frac{\partial P}{\partial y}; \quad \alpha = \frac{\gamma_\alpha - \gamma_V}{T}; \quad \overline{W} = \rho g W; \quad D = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y};$$

$$\frac{dn \ln \pi}{dt} = \frac{1}{\chi}\frac{dn \ln P}{dt} = \frac{\Gamma}{\chi P}.$$

Система (2.75) является основной для определения Γ – неадвективных изменений давления. Поскольку эта система явно не содержит производных по времени, то мы в дальнейшем будем называть ее диагностической частью гидродинамической модели.

Оценка вклад членов ε_π и ε_θ показывает, что ε_θ характеризует турбулентную передачу тепловой энергии и в атмосфере ε_π, ε_θ имеют одинаковый порядок ($0{,}5 \cdot 10^{-6}$ с$^{-1}$). Этот порядок сравним с величиной горизонтальной дивергенции, и поэтому турбулентные потоки тепла и энергии следует принимать во внимание. Члены, подобные ε_θ, обычно вводятся в традиционное упрощенное уравнение притока тепла.

Турбулентный поток механической энергии ε_π обычно не рассматривается в уравнениях гидромеханики применительно к атмосфере [55]. В рамках мелкомасштабных явлений изотропной турбулентности это оправдано в какой-то мере, что нельзя сказать о мезо- и крупномасштабных процессах, где механизм турбулентной передачи энергии играет заметную роль [38, 174].

Если в первом уравнении из (2.75) оставить только члены с горизонтальной турбулентностью, то можно написать:

$$\delta P_{TYP\delta} \approx 0{,}032(0{,}68\Delta H - \Delta T) \text{ (в мб/сутки)}. \tag{2.76}$$

где $\overline{\Delta H}$ и $\overline{\Delta T}$ – средние значения в тропосфере ΔH и ΔT. Символ Δ означает здесь конечно-разностный аналог оператора Лапласа.

Результаты расчетов указывают на существенную роль горизонтального турбулентного переноса механической энергии (ε_π) в динамике циклона, особенно заметно его роль в конечной стадии развития.

2.2.5. Численная модель неадвективных изменений давления

Рассмотрим упрощенную модель без конденсации. Следуя работе [167], изложим численную схему для диагностической части. Для удобства уравнений (2.75) перепишем их в виде:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial z} + \frac{g}{\chi R T_v}\Gamma + \alpha \overline{W} = B + \frac{g}{R T_v}\tilde{\varepsilon}_1; \tag{2.77}$$

$$\frac{\partial \overline{W}}{\partial z} + \alpha \overline{W} + \frac{g}{\chi R T_v} \Gamma = -\frac{g}{R T_v} \left(pD - \tilde{\varepsilon}_2 \right). \tag{2.78}$$

Атмосферу разбиваем на слои неодинаковой толщины, границы которых будем называть основными уровнями и обозначать целыми индексами. Введем также дробные индексы, соответствующие серединам слоев. Поверхность земли и верхняя граница модели (z_T) должны быть «дробными» уровнями. В связи с этим вводятся фиктивные уровни, лежащие ниже поверхности земли, и некоторый уровень z_L, лежащий выше z_T.

Введем обозначения:

$$\Delta z_l = z_{l+½} - z_{l-½}; \quad \Delta z_{l+½} = z_{l+1} - z_{l-1},$$

где l – порядковый номер основных уровней и $l \pm \frac{1}{2}$ – нумерация «дробных» уровней.

Проинтегрируем (2.77) в интервале $z_{l-1} < z < z_{l+1}$, а (2.78) в интервале $\Delta z_{l+½} = z_{l+1} - z_{l-1}$. В полученных уравнениях исключим $\overline{W}$. В результате придем к следующему трехточечному разностному уравнению для определения Γ:

$$a_l \Gamma_{l-1} - b_l \Gamma_l + c_l \Gamma_{l+1} = F_l, \tag{2.79}$$

где

$$a_l = \left(\chi - \frac{g \Delta z_{l-½}}{2 R T_{l-1}} \right) \beta_{l-½}; \quad c_l = \left(\chi - \frac{g \Delta z_{l+½}}{2 R T_{l+1}} \right) \beta_{l+½};$$

$$b_l = \left(\chi - \frac{g \Delta z_{l+½}}{2 R T_l} \right) \beta_{l+½} + \left(\chi + \frac{g \Delta z_{l-½}}{2 R T_l} \right) \beta_{l-½} + \alpha_{l+½} \alpha_{l-½};$$

$$\beta_{l\pm½} = \frac{R T_l \alpha_{l\pm½}}{g \Delta z_l \Delta z_{l\pm½}} \left(1 \pm \frac{\alpha_{l\pm½} \Delta z_l}{2} \right);$$

$$F_l = \chi \alpha_{l+½} \alpha_{l-½} (pD)_l + \beta_{l+½} (\Delta z B)_{l+½} - \beta_{l-½} (\Delta z B)_{l-½} - \frac{\chi \alpha_{l+½} \alpha_{l-½}}{2} \tilde{\varepsilon}^{(2)}_{l+½} +$$

$$+ \frac{g \Delta z_{l+½}}{R T_{l+½}} \beta_{l+½} \tilde{\varepsilon}^{(1)}_{l+½} - \frac{\chi \alpha_{l+½} \alpha_{l-½}}{2} \tilde{\varepsilon}^{(2)}_{l-½} - \frac{g \Delta z_{l-½}}{R T_{l-½}} \beta_{l-½} \tilde{\varepsilon}^{(1)}_{l-½}.$$

Разностное уравнение (2.79) хорошо решается методом факторизации (прогонки), для чего необходимо добавить краевые условия.

Изменение давления, как это видно из (2.79), зависит от следующих факторов: дивергенции во всей толще атмосферы, горизонтальной бароклинности B, внешних притоков тепла на различных уровнях атмосферы и, наконец, от краевых условий, где наиболее интересными являются орографические вертикальные движения W_0. Кроме этого, решение зависит от стратификации атмосферы (параметра α). Наличие такого большого количества факторов затрудняет качественный анализ

уравнения (2.90). С целью выявления некоторых закономерностей и оценки роли различных факторов были проведены расчеты Г в зависимости от модельных распределений параметров, входящих в уравнение. Поскольку почти все параметры (кроме дивергенции) входят в правую часть линейно, интересно было оценить роль вертикальной нелинейности, обязанной изменению температуры с высотой.

Горизонтальная бароклинность B играет большую роль в динамике атмосферных процессов. Изучение вклада радиационного притока тепла в изменение давления представляет большой интерес при разработке прогностических моделей. Поскольку приток тепла в нашей модели входит в краевые условия, было интересно выяснить характер его влияния на изменение давления. Радиационное нагревание на верхней границе (0,25°/ч) вызывает рост давления порядка 0,7–1 мб/12 ч во всей нижележащей атмосфере.

2.3. *Динамика вертикальных движений в облачной атмосфере*

Вертикальные движения в атмосфере в процессах масштаба играет большую роль. Необходимость теоретического подхода к определению вертикальных движений вызвана отсутствием методов измерения этого метеорологического параметра. Вертикальные скорости является важным бароклинным параметром, определяющим перераспределение потенциальной и кинетической энергии в вертикальном направлении. Помимо этого, благодаря вертикальным движениям, происходит перенос водяного пара и процессы конденсации в атмосфере. Тесно связанные с конденсацией явления облакообразования и осадков, измеряемые в атмосфере, используется для оценки качества вертикальных движении. Существует обширная литература, посвященная методам расчета вертикальных скоростей [68, 77, 136, 196, 198, 204, 296]. Разнообразие подходов и методов превращает анализ этих методов в специальное исследование.

Впервые обстоятельное изложение его дано в работах Н.И. Булеева и Г.И. Марчука [42] и Хинкельмана [193], где вертикальная скорость (а точнее $\omega = \frac{dP}{dt}$) находится из решения эллиптического уравнения, в правой части которого имеются источники, вызываемые распределением адвекции вихря и температуры. Дальнейшее развитие этот метод получил в работах [44, 200].

Ф. Томпсон впервые в своей книге [299] обратил внимание, что такое балансовое соотношение (уравнение) можно построить в декартовых координатах довольно точно из системы уравнений, включающей уравнения неразрывности, притока тепла, состояния и гидростатики. Для состояния сухой атмосферы задача сводится к следующему уравнению:

$$\frac{\partial}{\partial z} P \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial z}(PD) + \frac{1}{\chi}\frac{\partial P}{\partial z} D + \frac{1}{\chi}\frac{\partial}{\partial z}\left(P \frac{\tilde{\varepsilon}}{C_P} \right) + \frac{pB}{\chi}, \tag{2.80}$$

где $D = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y}$.

Интегрирование этого уравнения не вызывает трудностей при условиях:

$$z = 0;\ W = W_0(x, y),\ \ z \to \infty,\ p \to 0. \tag{2.81}$$

Похожее уравнение было получено Кимом [88] при некоторых упрощающих предположениях. В работах [165, 169] вышеприведенное уравнение обобщено на случай влажной атмосферы, в которой протекают процессы конденсации.

2.3.1. Вывод уравнения для вертикальной скорости в насыщенной атмосфере

Вывод уравнения для вертикальной скорости в насыщенной атмосфере удобно осуществить с помощью уравнений (2.49) и (2.52) и введя в эти уравнения диссипативные члены ε_0, ε_π и ε_m получим:

$$\frac{\partial}{\partial z}\phi_1\frac{\partial W}{\partial z} + \mu\frac{\partial \ln P}{\partial z}\frac{\partial W}{dz} = -\frac{1}{\chi}B - \frac{\partial}{\partial z}\left(\phi_1 D - \phi_2\frac{\tilde{\varepsilon} + \varepsilon_\pi}{C_P}\right) -$$
$$-\frac{\partial \ln P}{\partial z}\left(\left(\mu\phi_1 - \frac{1}{\chi}\right)D_2 - \left(\mu\phi_2 - \frac{\nu}{\chi}\right)\frac{\tilde{\varepsilon}}{C_P} + \left(\frac{\nu_1}{\chi} - \mu\phi_2\right)\frac{\varepsilon_\pi}{C_P} - \frac{\nu_2\varepsilon_0}{\chi C_P} - \frac{\nu_3\varepsilon_m}{\chi C_P}\right), \tag{2.82}$$

где $divV = D + \dfrac{\partial W}{\partial z};\ \ D_2 = D + I^*$.

Это описывает баланс между вертикальными движениями, горизонтальной бароклинностью, плоской дивергенцией и притоками тепла. Предполагая все факторы, кроме W, известными, уравнение (2.82) можно рассматривать как дифференциальное уравнение для определения вертикальных движений. Это уравнение второго порядка и, следовательно, его необходимо дополнить двумя краевыми условиями. На нижней границе возьмем:

$$z = 0,\ W = W_0(x, y). \tag{2.83}$$

Плоской Земли $W_0 = 0$. На верхней границе:

при $z \to \infty$
$$\frac{dP}{dt} \to 0, \tag{2.84}$$

или
$$p \to 0. \tag{2.85}$$

Уравнение (2.82) можно привести к иному виду. Умножая уравнение на p^{μ/φ_1}, получим после несложных преобразований:

$$\frac{\partial}{\partial z}\varphi_1 p^{\mu/\varphi_1}\frac{\partial W}{\partial z} = p^{\mu/\varphi_1}F, \tag{2.86}$$

где F – правая часть уравнения (2.82).

Теперь решение уравнения (2.86) с учетом краевых условий (2.83), (2.85) нетрудно выписать в квадратурах.

2.3.2. Определение вертикальных скоростей во влажной ненасыщенной атмосфере

Прологарифмируем уравнение состояния, в котором исключена плотность из уравнения неразрывности и положено $\alpha_3 = 0$, $m^* = m$ и $\Gamma^* = 0$, уравнение притока тепла, разделив на β_p и проинтегрировав уравнение от 0 до Z, придем к следующему выражению:

$$W = W_0(x,y) - \int_0^\infty \left[G_D(z,z')D - \frac{1}{\chi} G_B(z,z')B \right] dz' +$$
$$+ \int_0^Z \left[\frac{\tilde{\varepsilon}}{C_P(1+1{,}83\chi m)} + \frac{\tilde{\sigma}}{\beta} \frac{d\ln(1+m)}{dt} \right] dz',$$

где $\beta = \dfrac{1+1{,}83m}{1+1{,}83\chi m}$; $\tilde{\sigma} = \dfrac{1}{1{,}83\chi m}\left(0{,}606\beta - \dfrac{\chi-1}{\chi}\dfrac{1}{0{,}623-0{,}378m}\right)$;

$$G_B = \delta\sigma(z') + (1-\delta)\sigma(z)\frac{P(z')}{P(z)}; \quad G_D = \delta\left(1 - \frac{g\sigma(z')}{\chi RT(z')}\right) - (1-\delta)\frac{g\sigma(z)}{\chi RT(z')}\frac{P(z')}{P(z)};$$

G_D, G_B – Функции Грина для (Z = 1, 5, 6 и 12 км). Эти функции мало отличаются от таковых, рассчитанных для сухой атмосферы.

Особенности, вытекающие из вида Грина. Во-первых, видно влияние сжимаемости, проявляющееся в том, что на величину вертикальной скорости оказывают влияние дивергенция во всей толще атмосферы. Чем больше высота Z, тем существеннее оказывается влияние самых верхних уровней. Что касается горизонтальной бароклинности и турбулентного потока тепла, то их эффект также проявляется сильнее на больших высотах. Турбулентный поток энергии влияет на вертикальные движения подобно дивергенции, как это следует из вида функции Грина для W.

Если в атмосфере отсутствуют облака, то единственным механизмом, регулирующим перераспределение влажности в пространстве, является турбулентный обмен [115]. Тогда мы можем выписать уравнение переноса отношения смеси, добавив к нему турбулентный обмен:

$$\frac{dm}{dt} = K_h \Delta m + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial m}{\partial z}, \tag{2.87}$$

где K, K_h – коэффициенты турбулентного обмена в вертикальном и горизонтальном направлениях. Обозначая через ΔW_h вклад в вертикальные движения слоя толщиной Z–Z_1 изменений влажности, имея в виду, что $\dfrac{\tilde{\sigma}}{\beta}\dfrac{1}{1+m} \approx 0{,}2$ приближенно можно записать:

$$\Delta W_h \approx 0{,}2\left[K \frac{\partial m}{\partial z}\Big|_{Z_1}^{Z} + (z - z_1) K_h \Delta \tilde{m} \right], \tag{2.88}$$

где $\tilde{m}$ – среднее соотношение смеси в слое Z–Z_1.

Первое слагаемое (2.88) зависит от характера вертикального распределения отношения смеси.

Характерно, что кривая распределения влажности обычно на высоте довольно резко убывает, за счет чего в районе перелома должны наблюдаться дополнительные приращения W, направленные вниз.

Количественные оценки дают небольшие величины ΔW_h (порядка 1 мм/с). В общем-то, малые величины могут оказать заметное влияние, если условия для их существования будут длительное время сохраняться.

2.3.3. Расчет вертикальных движений в многослойной облачной атмосфере

Расчет вертикальных движений в облачной среде осложнен тем, что уравнение содержит переменные коэффициенты, от которых существенно может зависеть характер решения.

В реальных условиях коэффициенты уравнения будут терпеть разрыв на границе облачной среды. Скачки коэффициентов довольно значительны, и поэтому для численной реализации уравнения необходимо применять методы «сквозного счета» [117].

Перепишем уравнение (2.52) в новых обозначениях:

$$\frac{\partial \omega}{\partial z} + \mu' \frac{\partial \ln P}{\partial z}\omega = pB - \frac{\partial p}{\partial z}\left(D_2 - \frac{\nu\tilde{\varepsilon} - \nu_1\varepsilon_\pi - \nu_2\varepsilon_\theta}{C_p}\right); \tag{2.89}$$

$$\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{\varphi_2}{\chi C_p \varphi_1}\left(\tilde{\varepsilon} + \varepsilon_\pi\right) - \frac{\omega}{\chi\varphi_1 p} - D_2, \tag{2.90}$$

где $\omega = \dfrac{dP}{dt}$; $\quad \mu' = \mu - 1$; $\quad \left(D_2 - \dfrac{\nu\tilde{\varepsilon} - \nu_1\varepsilon_\pi - \nu_2\varepsilon_\theta}{C_p}\right)$.

Введем дискретную систему точек, полагая $Z_K = K\Delta Z_K$, где $K = 0,\ 1,\ 2,\ldots,\ M$ и проинтегрируем (2.89) по Z от $Z_{K+1/2}$ до $Z_{K-1/2}$ основные функции, монотонно меняющиеся с высотой, внесем как среднее из-под знака интеграла, тогда получим:

$$\begin{aligned} &\omega_{K+1/2} - \omega_{K-1/2} + S_K\left(\omega_{K+1/2} + \omega_{K-1/2}\right) = \\ &= P_K B_K \Delta z_K - \left(P_{K+1/2} - P_{K-1/2}\right)(D_2)_K - r_K\tilde{\varepsilon}_K - r_K^{(1)}(\varepsilon_\pi)_K + r_K^{(2)}(\varepsilon_\theta)_K; \end{aligned} \tag{2.91}$$

где $\varepsilon_\pi = \dfrac{1}{\pi}\left(K_h\Delta\pi + \dfrac{\partial}{\partial z}K\left(\dfrac{\partial\pi}{\partial z} - \dfrac{\partial\pi_0}{\partial z}\right)\right)$; $\quad \varepsilon_\theta = \dfrac{1}{\theta}\left(K_h\Delta\theta + \dfrac{\partial}{\partial z}K\left(\dfrac{\partial\theta}{\partial z} - \dfrac{\partial\theta_0}{\partial z}\right)\right)\dfrac{\chi - 1}{\chi}$;

$$S_K = \frac{1}{2}\int_{Z_{K-1/2}}^{Z_{K+1/2}} \mu' \frac{\partial \ln P'}{\partial z'}dz'; \quad r_K = \frac{1}{C_P}\int_{Z_{K-1/2}}^{Z_{K+1/2}} \nu \frac{\partial \ln P'}{\partial z'}dz';$$

$$r_K^{(i)} = \int_{Z_{K-1/2}}^{Z_{K+1/2}} \nu_i \frac{\varphi_1}{\varphi_2}\frac{\partial P'}{\partial z'}dz', \quad (i = 1,\ 2).$$

Выразим теперь ω через W. Для этого проинтегрируем (2.90) по Z в интервале от Z_K до Z_{K-1} из-под знака интеграла внесем величины, монотонно меняющиеся с высотой, тогда получим:

$$W_K - W_{K-1} = \lambda_{K-\frac{1}{2}}\left(\tilde{\varepsilon}_K + \tilde{\varepsilon}_{K-1}\right) - \frac{\Delta Z_{K-\frac{1}{2}}}{2}\left[(\varepsilon_\pi)_K - (\varepsilon_\pi)_{K-1}\right] - \\ - \frac{\Delta Z_{K-\frac{1}{2}}}{2}\left[(D_2)_K + (D_2)_{K-1}\right] - \gamma_{K-\frac{1}{2}}\omega_{K-\frac{1}{2}}, \tag{2.92}$$

где $\lambda_{K-\frac{1}{2}} = \dfrac{1}{2C_P}\int\limits_{Z_{K-1}}^{Z_K}\dfrac{\varphi_2}{\varphi_1}dz'$; $\gamma_{K-\frac{1}{2}} = \dfrac{1}{\chi}\int\limits_{Z_{K-1}}^{Z_K}\dfrac{1}{\varphi_1 P}dz'$.

Исключением ω из (2.91) с помощью (2.92), разрешив его относительно $\omega_{K-\frac{1}{2}}$, эта операция приведет нас к следующему разностному уравнению для W:

$$a_K W_K - b_K W_K + c_K W_{K-1} = e_K^{(1)}\tilde{\varepsilon}_{K+1} + e_K^{(2)}\tilde{\varepsilon}_K + e_K^{(3)}\tilde{\varepsilon}_{K-1} - \beta_K B_K - r_K^{(2)}(\varepsilon_\theta)_K + \\ + d_k^{(1)}(D_2)_{K+1} + d_k^{(2)}(D_2)_K + d_k^{(3)}(D_2)_{K-1} + l_K^{(1)}(\varepsilon_\pi)_{K+1} + l_K^{(2)}(\varepsilon_\pi)_K + l_K^{(3)}(\varepsilon_\pi)_{K-1}; \tag{2.93}$$

$$a_k = \frac{1+S_K}{\gamma_{K+\frac{1}{2}}}; \quad c_k = \frac{1-S_K}{\gamma_{K-\frac{1}{2}}}; \quad b_k = a_k + c_k; \quad e_K^{(1)} = (1+S_K)\left(\frac{\lambda}{\gamma}\right)_{K+\frac{1}{2}};$$

$$\overline{W'\pi'} = -K_\pi^*\left(\frac{\partial\overline{\pi}}{\partial Z} - \frac{\partial\pi_0}{\partial Z}\right); \quad e_K^{(2)} = e_K^{(1)} + e_K^{(3)} + r_K; \quad d_K^{(1)} = -(1+S_K)\frac{\Delta Z_{K+\frac{1}{2}}}{2\gamma_{K+\frac{1}{2}}};$$

$$d_K^{(3)} = (1-S_K)\frac{\Delta Z_{K-\frac{1}{2}}}{2\gamma_{K-\frac{1}{2}}}; \quad l_K^{(2)} = l_K^{(1)} + l_K^{(3)} + r_K^{(1)}; \quad d_K^{(2)} = d_K^{(1)} + d_K^{(3)} + P_{K+\frac{1}{2}} - P_{K-\frac{1}{2}};$$

$$\beta_K = p_K\Delta Z_K; \quad l_K^{(1)} = -(1+S_K)\frac{\Delta Z_{K+\frac{1}{2}}}{2}; \quad l_K^{(3)} = (1-S_K)\frac{\Delta Z_{K-\frac{1}{2}}}{2}.$$

Зная по данным радиозондирования значения φ_i на всех высотах, можно вычислить все коэффициенты уравнения (2.93) и затем, вычислив правую часть, решить это уравнение методом прогонки.

Для некоторых целей, например, для качественных оценок, удобно записать (2.93) в матричном виде:

$$AW = S_1\varepsilon + S_2 D - S_s B - S_4\varepsilon_T + S_5\varepsilon_\pi,$$

и разрешить затем относительно W. Получаемые при этом матрицы

$$\Gamma_e = A^{-1}S_1; \quad \Gamma_d = A^{-1}S_2; \quad \Gamma_B = A^{-1}S_3$$

являются конечноразностными аналогами функции Грина для расслоенной облачной атмосферы.

2.3.4. Примеры расчета вертикальных движений вблизи облаков

Расчет вертикальных движений вблизи облаков слабоконвективных форм представляет большой интерес. Как уже было показано, основными факторами, обеспечивающими формирование вертикальных движений, являются: горизонтальная дивергенция, радиационные и турбулентные притоки тепла, горизонтальная бароклинность. Естественно, что расчеты можно проводить для тех случаев, в которых имеются сведения, позволяющие определить вышеперечисленные факторы. Поскольку практически невозможно было найти такие данные, вопрос рассматривался аддитивно для каждого фактора, прибегая иногда к модельным рассмотрениям.

Начнем с обсуждения роли радиационных притоков тепла [180].

Е.М. Фейгельсон [203] провела расчеты длинноволнового радиационного притока в окрестности облака, из которых обнаруживается довольно интенсивная тепловая «яма» в верхнем облачном слое. Используя только эти результаты, мы рассчитали W, которые в дальнейшем будем называть радиационными вертикальными движениями (РВД). В табл. 27 приведены эти данные.

Таблица 27

Вертикальное распределение радиационного притока тепла и соответствующих им вертикальных скоростей W вблизи облачного слоя 1–2 км

Высота, км	P 1–2 км, кал./м·мин	W, мм/с	W без учета конденсации
6	–0,6	–4,7	–5,7
5	–0,6	–4,4	–5,4
4	–0,6	–4,1	–5,1
3	–0,6	–3,8	–4,8
2	–10,0	–1,2	–2,2
1	+0,8	+0,18	+0,15
0	–0,2	0	0

Мы видим, что РВД имеют малый порядок, но все же одного порядка с крупномасштабными ВД. Аналогичные результаты другим методом получены в работе [220].

Примечательным является то, что длинноволновое радиационное выхолаживание в верхней части облака формирует в пространстве над облаком нисходящие движения, как бы ограничивая его развитие в вертикальном направлении. В общем случае радиационное выхолаживание всегда создает нисходящие движения. Поскольку безоблачная атмосфера в целом, как правило, обладает этим свойством, то, следовательно, РВД на верхней границе атмосферы обеспечивают самосохранение атмосферы Земли, как бы сжимая ее. Конечно, в областях сильного радиационного нагревания (поглощение длинноволновой и коротковолновой радиации) картина будет обратная. Это подтверждают РВД (табл. 28), рассчитанные для безоблачной атмосферы по данным Монабе-Мюллера [265], с учетом данных Божкова [219], но поглощению коротковолновой радиации озоном. Роль

горизонтальной дивергенции общеизвестна, поскольку для несжимаемой атмосферы W обычно определяется исключительно распределением горизонтальной дивергенции. Но особенностью сжимаемой атмосферы является то, что вертикальные движения в ней определяются распределением дивергенции во всей толще атмосферы. При этом влияние высоких слоев атмосферы сможет быть весьма значительно.

Только благодаря такому примечательному свойству сжимаемой атмосферы можно объяснить ряд явлений бурного развития (интенсификации вертикальных движений) в нижней тропосфере: генерация депрессии при выходе к побережью моря, океана, бурное развитие конвекции при наличии сильной дивергенции в верхней тропосфере в зоне ВЗК и т.д.

Рассмотрим, какую роль в динамике вертикальных движений играют процессы генерации облачных элементов. В частности, покажем какое влияние оказывают процессы накопления или выпадения жидкой фракции облака (процессы аэродинамического вовлечения воздуха падающими каплями здесь не учитываются). Распределение W, обязанное процессам накопления $\left(\frac{d\delta}{dt} > 0\right)$ или убывания $\frac{d\delta}{dt} < 0$ удельной влажности облака, если в верхней части облака происходит концентрация, накопления жидкой фракции, то это будет вызывать дополнительные восходящие вертикальные движения внутри облака и над ними. Если же в верхней части облака началось гравитационное оседание жидких капель, то создаются дополнительные нисходящие движения. Любое искусственно или естественно начавшееся оседание капель облака создает условие для саморассеивания облака. Этот результат совпадает с выводами работы [13], в которой предложен метод рассеивания облаков с помощью искусственного создания нисходящих струй.

Таблица 28

Приток тепла в атмосфере (по Монабе-Мюллеру) и соответствующие им вертикальные движения (сухая атмосфера)

Высота, км	ε, сутки$^{-1}$	W, км/сутки
50	+0,00111	0,0677
37	+0,00082	–0,0375
27	+0,00044	–0,0580
20	–0,00046	–0,0585
15	–0,00180	–0,0535
12	–0,00320	–0,0460
10	–0,00420	–0,0385
8	–0,00460	–0,0300
6	–0,0044	–0,0200
4	–0,0034	–0,0226
2	–0,0029	–0,0061

Мы рассмотрели такие основные факторы, как горизонтальная дивергенция и радиационный приток тепла. В приведенных ниже примерах показана роль другого важного фактора горизонтальной бароклинности в динамике вертикальных движений [173].

2.3.5. Параметризация конвективных процессов в численных прогнозах

Конвективные процессы являются эффективным механизмом передачи энергии из нижних слоев атмосферы в верхние. Кроме того, конвекция является механизмом стабилизации неустойчивых атмосферных процессов. Чрезмерно большую роль влажно-конвективные движения играют в теории развития тайфунов. Поскольку конденсационные процессы в кучевых облаках по пространственным и временным масштабам являются более мелкими процессами, то при расчетах крупномасштабных движений приходится использовать приемы параметризации влажной конвекции.

Ку [262], используя линейную теорию возмущений, показал, что в неустойчивой атмосфере наиболее неустойчивая мода имеет размер кучевых облаков. Эта форма неустойчивости была названа «условная неустойчивость первого рода». Ку заметил, что чисто гравитационная мода имеет также тенденцию к росту и ее пространственный размер соответствует размеру тропических циклонов. Поскольку первая мода наиболее неустойчивая, то она будет доминировать. Затем Чарней и Элиассен [231] внесли дальнейшую ясность в вопрос о сдвиге неустойчивости в сторону более крупномасштабных движений.

Используя 2-уровневую модель с учетом поверхностного трения и параметризацией нагревания кучевых облаков как функции вертикальных движений на верхней границе планетарного пограничного слоя, они показали, что наиболее неустойчивая мода имеет горизонтальный масштаб примерно 100 км (а не 1 км, как у КУ). Эта неустойчивость получила название «конвективная неустойчивость второго рода» (CISK). Этот метод требует параметризации нагревания кучевыми облаками.

Рассмотрим три существенных подхода к такой параметризации.

1. Оайама [277, 278] предложил своеобразную форму параметризации конвекции, основанную на некотором свойстве атмосферы в тропической области. Частицы из пограничного слоя всегда оказываются теплее окружающего и способны проникать до больших высот. Учитывая вышесказанное, в уравнение притока тепла вводится дополнительный приток тепла за счет конденсации ε_c следующего вида: $\varepsilon_c = -\eta S W_p$, где W_p – вертикальная скорость на верхней границе погранслоя; η – некоторый параметр, являющийся функцией пространственных координат, характеризующий степень передачи потока тепла, идущего с пограничного слоя в верхние уровни. Существует несколько способов задания η и все они мало апробированы на практических моделях. Так, в [210] предполагается использовать

$$\eta = \frac{W_1}{W_P}, \tag{2.94}$$

где W_1 – крупномасштабные вертикальные движения.

Эта форма задания η предполагает, что приток от конденсации целиком идет на компенсацию охлаждения за счет адебиатического подъема.

Оайама [277] использовал выражение:

$$\eta = \frac{(\theta_e)_0 - (\theta_e)_1}{(\theta_e)_2 - (\theta_e)_1}, \tag{2.95}$$

где θ_e – эквивалентно-потенциальная температура.

Индекс 0 соответствует пограничному слою, 1 – окружающему пространству, а 2 – облакам.

В экспериментах по моделированию зональной экваториальной циркуляции П.Ю. Пушистов [152] применил выражение:

$$\eta = \frac{Lq_e}{S} \frac{T_e - T}{\int\limits_{P_0}^{P} (T_e - T)\, dp}, \tag{2.96}$$

Хайаши [248] и Т. Нитта [278] строили функции η по данным наблюдений. Задание η в форме (2.105), (2.106) применимо в тропических районах, где действует механизм проникающей влажной конвекции, начинающейся с планетарного пограничного слоя. В умеренных широтах конвективные процессы могут начаться с высот. Лежащих выше пограничного слоя, и поэтому задание η необходимо делать, исходя из других гипотез.

В этом способе конвективное нагревание распространяется до 100 миллибаровой поверхности и достигается благодаря непосредственному перемешиванию облачного и окружающего воздуха. Этот же механизм осуществляет приток влаги в окружающую атмосферу. Пограничный слой в этом способе является своего рода непрерывным источником энергии, которая перераспределяется на вышележащих уровнях.

2. Этот метод пришел из моделей по общей циркуляции атмосферы [255] и является наиболее экономичным и простым для целей длительного интегрирования. Предполагается, что перемешивание благодаря C_U происходит мгновенно таким образом, что условно неустойчивая порция атмосферы «замещается» кучевым облакам, т.е. влажноадиабетической стратификацией. Требование, чтобы приспособленная энергия устойчивости $E_a = gz + C_pT + Lq$ в точке сетки была равна интегралу по вертикали от неприспособленного энергии устойчивости, является гарантией того, что не будет наблюдаться резкого изменения энергии вследствие приспособления. Приспособление осуществляется, если атмосфера устойчива и относительная влажность больше 100%.

3. Данный метод основан на идее Аракавы [210]. Предполагается, что, если некоторый поток массы должен подниматься влажноадиабатически в облаке, то должно наблюдаться компенсационное движение вне облака. В этом методе нагревание осуществляется как за счет переноса скрытой теплоты конденсации в верхние уровни, так и за счет адебиатического нагревание окружающего воздуха на всех уровнях. Степень нагревания определяется распределением энергии устойчивости E_a. Если на нижнем уровне E_a становится больше, чем на вышележащем, то энергия передается посредством конвекции в верхние уровни в течение некоторого

времени релаксации τ. Условная неустойчивость атмосферной модели удаляется в течение этого времени в сторону устойчивости, если энергия не получает снова дополнительной порции из пограничного слоя за счет конвергенции трения и турбулентных потоков.

Более совершенный подход был разработан в работе Аракавы и Шуберта [211]. Применение этого метода в глобальных моделях представляет большой интерес. В любой момент времени возникающая энергия сухо- или влажноустойчивости контролируется вертикальным турбулентным обменом таким образом, что в результате этого механизма температурная стратификация атмосферы и распределение влажности стремятся приблизить устойчивость к нейтральному состоянию. Такое предположение вполне допустимо в крупномасштабных моделях, где каждая точка представляет собой среднее состояние в окружающем квадрате размером d^2, где d – горизонтальный шаг сетки. Пусть это нейтральное состояние характеризуется вертикальными распределениями $\tilde{\pi} = \left(\frac{\tilde{P}}{1000}\right)^{R/C_P}$ и $\tilde{T}$, которые связаны между собой уравнением гидростатики:

$$\tilde{T} = -\frac{g}{C_P \frac{\partial \ln \tilde{\pi}}{\partial z}}. \tag{2.97}$$

В работе [217] нейтральную температурную стратификацию предлагается определять следующим образом:

$$\tilde{\gamma}(z) = \begin{cases} \gamma_a, & 0 < r < \tilde{r} \\ \gamma_a \dfrac{1-r}{1-\tilde{r}} - \gamma_{ba} \dfrac{r-\tilde{r}}{1-\tilde{r}}, & \tilde{r} < r < 1. \end{cases} \tag{2.98}$$

Здесь γ_a, γ_{ba} – сухо- и влажноадиабатические градиенты; r – относительная влажность. Значение $\tilde{r}$ принимается постоянным и подбирается в процессе экспериментов.

Вычислив $\tilde{\gamma}$ по данным вертикального распределения T и m, находится $\tilde{T}$ путем интегрирования уравнения:

$$\frac{d\tilde{T}}{dz} = -\tilde{\gamma}(z), \tag{2.99}$$

с условием:

$$\tilde{T}(0) = T_0.$$

Затем из уравнения гидростатики находим:

$$\tilde{\pi} = \pi_0 \exp\left(-\frac{g}{c_P} \int_o^Z \frac{dz}{\tilde{T}}\right). \tag{2.100}$$

Теперь представим, что неустойчивость реализуется путем вертикального турбулентного обмена (смотри также [232]) посредством следующего итерационного процесса:

$$T^* = T + \frac{1}{\tau}\frac{\partial}{\partial z}K\left(\frac{\partial T^*}{\partial z} - \tilde{\gamma}\right),$$

где звездочкой обозначены приспособленные величины; τ – время релаксации итерационного процесса, Это эквивалентно решению уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial z}K(z)\left(\frac{\partial T^*}{\partial z}\right) - \frac{T^*}{\tau} = -\frac{T}{\tau} - \frac{\partial K\tilde{\gamma}}{\partial z}. \tag{2.101}$$

При заданных значениях T^* на верхней и нижней границах области это уравнение удобно решать методом прогонки. Если в модели температура не прогнозируется явно, то аналогичная задача должна быть решена для π^*:

$$\frac{\partial}{\partial z}K(z)\left(\frac{\partial \pi^*}{\partial z}\right) - \frac{\pi^*}{\tau} = -\frac{\pi}{\tau} - \frac{\partial}{\partial z}\left(K\frac{g\tilde{\pi}}{C_P\tilde{T}}\right), \tag{2.102}$$

при заданных значениях π^* на границах.

Тогда приток тепла за счет конвективного нагревания определится выражением:

$$\frac{\chi\varepsilon_{\tilde{n}}}{C_P} = \frac{T - T^*}{T}\frac{1}{\tau}.$$

Далее считаем, что общая энергия $h = C_P T + gz + Lm$ остается консервативной в частице в пределах рассматриваемого объема. Условие консервативности заменим условием отсутствия диссипации:

$$\frac{\partial}{\partial z}K\frac{\partial h^*}{\partial z} = 0. \tag{2.103}$$

Тогда из (2.82) следует, что

$$L\frac{\partial}{\partial z}K\frac{\partial m^*}{\partial z} + C_P\frac{\partial}{\partial z}K\frac{\partial T^*}{\partial z} = 0,$$

или, привлекая (2.101),

$$\frac{\partial}{\partial z}K\frac{\partial m^*}{\partial z} = \frac{C_P}{L}\left(\frac{T - T^*}{\tau} + \frac{\partial K\tilde{\gamma}}{\partial z}\right). \tag{2.104}$$

Решение этого уравнения дает приспособленное распределение влажности (отношение смеси).

Зная теперь $T^* - T$, из уравнения Клаузиуса-Клапейрона находим насыщающее отношение смеси, соответствующее новой, приспособленной температуре:

$$m_H^* = m_H\left(1 + 0{,}6\frac{L(T^* - T)}{RT^2}\right). \tag{2.105}$$

Общее количество воды, выделившееся в результате приспособления, определяется путем следующего суммирования по слоям:

$$Q = \sum_{l=1}^{l_r} \left(m - m_H^* \right)_l r_l, \tag{2.106}$$

где r_l – относительная влажность.

Опять проверяется условие $\gamma > \tilde{\gamma}$.

Если оно выполняется, то вся описанная выше процедура продлевается снова. Заметим, что отрицательное значение Q говорит о том, что конденсация фактически не происходила и уравнение для отношения смеси (2.104) не было необходимости решать. В этом случае находятся T^* или π^* по (2.101), (2.102) и m_H^* по (2.105), а m остается без изменений.

2.3.6. Учет фронтальных поверхностей при расчете вертикальных движений

Методы расчета вертикальных движений позволяют довольно легко ввести в рассмотрение фронтальную поверхность. Наличие фронтальных поверхностей требует постановки соответствующих краевых условий [87, 152, 153].

Поскольку фронтальная поверхность состоит из одних и тех же частиц, то для нее имеем:

$$\frac{dpS_1}{dt} = \frac{dpS_2}{dt} \quad \text{или} \quad \omega S_1 = \omega S_2. \tag{2.107}$$

Здесь ωS_1, ωS_2 – значение ω на фронтальной поверхности со стороны воздушной массы, обозначенной индексом 1 (теплая) и 2 (холодная).

Пусть далее фронтальная поверхность задана уравнением:

$$z = \xi(x, y, z).$$

Условие непрерывности нормальной составляющей скорости дает:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \overset{s}{U}_1 \frac{\partial \xi}{\partial x} + \overset{s}{V}_1 \frac{\partial \xi}{\partial y} = \overset{s}{W}_1; \quad \frac{\partial \xi}{\partial t} + \overset{s}{U}_2 \frac{\partial \xi}{\partial x} + \overset{s}{V}_2 \frac{\partial \xi}{\partial y} = \overset{s}{W}_2.$$

Откуда следует, что:

$$[W] = [U]\frac{\partial \xi}{\partial x} + [V]\frac{\partial \xi}{\partial y}, \tag{2.108}$$

где значок [ ] означает следующую операцию:

$$[f] = \overset{s}{f}_1 - \overset{s}{f}_2.$$

Выражения (2.118) и (2.119) определяют динамическое и кинематическое условия на фронтальной поверхности. Из (2.118) следует, что интегрирование уравнения можно проводить по всей толще атмосферы, не обращая внимания на присутствие фронтальной поверхности. Интегрирование при условии на бесконечности дает:

$$\omega(z) = -\int_z^{\infty} \varepsilon \exp\left(\int_Z^{Z'} (\mu - 1) \frac{\partial \ln P}{\partial z''} dz'' \right) \left[PB + \frac{\partial P}{\partial z'} \left(D_2 - \frac{v\tilde{\varepsilon}}{C_P} \right) \right] dz'. \tag{2.109}$$

Переходим теперь к интегрированию в массе 2 ($\tilde{\varepsilon} = 0$):

$$W = W_0 - \int_0^Z D_2 dz' - \frac{1}{\chi}\int_0^Z \frac{\omega}{\varphi_1 p} dz'. \tag{2.110}$$

В массе интегрирование надо вести от фронтальной поверхности до произвольной высоты *Z*. Но для этого необходимо знать $\overset{s}{W}_1$. Записывая (2.110) при $Z = \xi$ и подставляя в (2.108), получим:

$$\overset{s}{W}_1 = W_0 - \int_0^\xi \left(D_2 + \frac{\omega}{\chi \phi_1 p} \right) dz' + [U]\frac{\partial \xi}{\partial x} + [V]\frac{\partial \xi}{\partial y}. \tag{2.111}$$

Используя (2.111) как краевое условие, интегрирование (2.107) в пределах массы I дает:

$$W = W_0 - \int_0^Z \left(D_2 + \frac{\omega}{\chi \varphi_1 p} \right) dz' + [U]\frac{\partial \xi}{\partial x} + [V]\frac{\partial \xi}{\partial y}. \tag{2.112}$$

В результате получим:

$$\begin{aligned} W = W_0 + \left(U\frac{\partial \xi}{\partial x} + V\frac{\partial \xi}{\partial y} \right)\delta - \\ - \int_0^Z D_2 dz' - \frac{1}{\chi}\int_0^Z \frac{\omega}{\varphi_1 p}\int_\infty^{Z'} \exp\left(\int_Z^{Z'} (\mu - 1)\frac{\partial \ln P}{\partial z''} dz'' \right)\left[PB + \frac{\partial P}{\partial z''} D_2 \right] dz'' dz', \end{aligned} \tag{2.113}$$

где $\delta = \begin{cases} 1 & z \geq \xi, \\ 0 & z < \xi. \end{cases}$

Эффект, характеризующий скачок ветра на фронте (второй член формулы (2.113)) проявляется только над фронтальной поверхностью (в холодной воздушной массе).

Формулы (2.114) представим в конечных разностях в виде [83]:

$$W_K = \sum_{n=1}^{N} \left(\alpha_{k,n} D_n + \beta_{k,n} B_n \right) + \frac{\delta}{3} J\left(\overset{s}{H}_1, \overset{s}{H}_2 \right) \tag{2.114}$$

(радиационный приток тепла не учтен).

Здесь $D_n = 2\Delta S\left(\delta U_x + \delta V_y \right)_n$; $B_n = U_n V_{n-1} - V_n U_{n-1}$; δU_x; δV_y конечные разности по *x* и *y* соответственно от *U*, *V*; *n* – номер уровня по вертикали.

$$J\left(\overset{s}{H}_1, \overset{s}{H}_2 \right) = (H_3 - H_4)(2H_0 - H_1 - H_2)$$

вычисляется на изобарической поверхности вдоль линии фронта. Коэффициенты $\alpha_{k,n}$ и $\beta_{k,n}$ даны в табл. 29. Значение D_n и B_n определяются по картам изобарических поверхностей.

Таблица 29

Коэффициенты и для расчета вертикальных движений в облачной и безоблачной атмосфере

	n/*k*	850	700	500	400	
$\alpha_{k,n}$	850	–0,40	–0,88	–0,88	–0,88	
	700	0,10	–0,28	–0,78	–0,78	I
	500	0,08	0,18	–0,15	–0,15	насыщенная или ненасыщенная атмосфера
	400	0,06	0,15	0,28	–0,04	
$\beta_{k,n}$	850	1,10	1,33	1,33	1,33	
	700	1,07	2,32	2,32	2,32	II
	500	0,77	1,66	3,16	3,16	ненасыщенная атмосфера
	400	0,60	1,33	2,54	3,28	
$\beta_{k,n}$	850	1,47	1,76	1,76	1,76	
	700	1,30	2,89	2,89	2,89	III
	500	0,85	1,88	3,66	3,66	насыщенная атмосфера
	400	0,66	1,46	2,82	3,60	

Пользуясь формулой (2.114) и табл. 29 можно рассчитать вертикальные скорости в м·с$^{-1}$ на изобарических поверхностях 850, 700, 500 и 400 мбар. Так как $\alpha_{k,n}$ слабо зависит от того, есть ли облака в данном слое или нет, то они используются для всех случаев. Если на данном уровне наблюдается конденсация (облака), то $\beta_{k,n}$ берется с третьего раздела таблицы, а если конденсация отсутствует, то берется значение со второго раздела.

2.4. Численная модель бароклинных процессов атмосферы и краткосрочного прогноза

Разработкой глобальных моделей для изучения общей циркуляции атмосферы активно занимаются за рубежом (смагоринский, касахара и вашингтон, минц и аракава и др.). Под руководством академика Г.И. Марчука, член-корреспондента Е.Н. Блиновой, профессоров М.И. Юдина, С.А. Машковича, Г.П. Курбаткина, С.С. Зилитинкевича, М.С. Фукс-Рабиновича, В.П. Садокова выполнены большие исследования по развитию прогностических моделей на средние и долгосрочные сроки с включением всех основных факторов. Используем гидродинамическую численную схему расчета, в которую включены лишь основные физические процессы: учет орографии, поверхностного трения, параметрический учет макротурбулентного обмена, турбулентный поток тепла от океана, подсеточная параметризация конвективных процессов, влагооборот, термодинамика земной поверхности, в том числе льда, снега и поверхности океана.

2.4.1. Основные уравнения атмосферной циркуляции

При разработке схемы прогноза мы воспользуемся преобразованием координат, применявшихся Шершковым [200] при решении мезометрологических задач. Вместо координаты вводится переменная ξ по соотношению:

$$\xi = b\left(1 - \exp(-az)\right), \tag{2.115}$$

где a, b – произвольные постоянные, подбираемые в зависимости от потребностей задач, этим трансформируем пространство по вертикали из $(0, \infty)$ в ограниченное пространство $(0, b)$.

В новой системе координат (x, y, ξ, t) запишем систему уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial\xi}\left(\frac{dnP}{dt}\right)-\frac{1}{\chi}\frac{\partial\ln P}{\partial\xi}\frac{dnP}{dt}=B_1-\frac{\partial P}{\partial\xi}\frac{\gamma_a-\gamma}{T}W;$$

$$\frac{1}{\chi}\frac{\partial\ln P}{\partial\xi}\frac{dnP}{dt}=\frac{\partial\rho gW}{\partial\xi}+\frac{\partial P}{\partial\xi}\frac{\gamma_a-\gamma}{T}W-\frac{\partial P}{\partial\xi}D;$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+m\left(U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}\right)+W\frac{\partial U}{\partial\xi}a(b-\xi)-V\left(l+U\frac{\partial m}{\partial y}\right)=-mRT\frac{\partial\ln P}{\partial x};$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+m\left(U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}\right)+W\frac{\partial V}{\partial\xi}a(b-\xi)+U\left(l+U\frac{\partial m}{\partial y}\right)=-mRT\frac{\partial\ln P}{\partial y};\quad(2.116)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t}+m\left(U\frac{\partial P}{\partial x}+V\frac{\partial P}{\partial y}\right)=\frac{dnP}{dt};$$

$$\frac{\partial\ln P}{\partial\xi}=\frac{g}{a(b-\xi)RT},$$

где $B_1=\dfrac{\partial U}{\partial\xi}\dfrac{\partial P}{\partial x}+\dfrac{\partial V}{\partial\xi}\dfrac{\partial P}{\partial y}$; m – параметр проекции.

Начальные и краевые условия:

$$t=0\text{: }u=u_0;\quad v=v_0;\quad p=p_0;\quad \xi=0:\quad w=w_0(x,y);$$

$$\xi=b\text{: }\frac{dnP}{dt}=0;\quad p=0.\qquad(2.116а)$$

Введем обозначения:

$$\pi=\left(\frac{P}{1000}\right)^{\frac{R}{C_p}};\quad\frac{dn\pi}{dt}=\Gamma;\quad\tilde{W}=a(b-\xi)W;\quad\tilde{B}=\frac{\partial U}{\partial\xi}\frac{\partial\pi}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial\xi}\frac{\partial\pi}{\partial y};$$

$$\tilde{\alpha}=\frac{1}{\chi-1}\frac{\partial\pi}{\partial\xi}+\frac{\pi}{b-\xi};\quad\tilde{\tilde{\alpha}}=\frac{\partial^2\pi}{\partial\xi^2}-\frac{1}{b-\chi}\frac{\partial\pi}{\partial\xi}=-\frac{\alpha}{a(b-\xi)}\frac{\partial\pi}{\partial\xi};$$

$\alpha=\dfrac{\gamma_a-\gamma}{T}$ – параметр статической устойчивости.

Тогда диагностическую часть модели запишем следующим образом:

$$\frac{\partial\Gamma}{\partial\xi}+\tilde{\tilde{\alpha}}\tilde{W}=\tilde{B};\qquad(2.117)$$

$$\pi\frac{\partial\tilde{W}}{\partial\xi}+\tilde{\alpha}\tilde{W}+\frac{\Gamma}{\chi-1}=-\pi D;\qquad(2.118)$$

$$\frac{\partial\ln P}{\partial\xi}=-\frac{g}{a(b-\xi)C_pT}.\qquad(2.119)$$

Температура вычисляется по формуле:

$$T_{l-1/2} = \frac{g}{aC_P}\frac{\ln\dfrac{b-\xi_l}{b-\xi_{l-1}}}{\ln\dfrac{\pi_l}{\pi_{l-1}}} = \frac{\sigma(\xi_l)}{\ln\dfrac{\pi_l}{\pi_{l-1}}}. \qquad (2.120)$$

Вычисленная температура более всего соответствует среднему значению в слое $\xi_{l-1} < \xi < \xi_l$, $\sigma(\xi_l) = \{11{,}49;\ 28{,}06;\ 39{,}56;\ 67{,}63\}$ при значениях $\xi_l = \{0{,}1;\ 0{,}3;\ 0{,}5;\ 0{,}7\}$ соответственно.

2.4.2. Конечно-разностная схема решения задачи

Поскольку левая часть системы (2.117)–(2.119) содержит только производную по ξ, то она решается независимо от прогностической части модели. Рассмотрим пространственно-временную сетку, по которой будет решаться задача.

В плоскости x, y, t производные заменяются центральными разностями по аналогии с работой [289]. Атмосфера разбивается по ξ на равномерные слои с $\Delta\xi = 0{,}2$. Помимо основных уровней вводятся промежуточные уровни. Основные параметры задачи (U, V, π, Γ) зафиксированы на основных уровнях ($l = 2, 3, 4, 5$), кроме $l = 1$ ($\xi = -0{,}1$), который является фиктивным, а вместо него носителем информации выбран промежуточный уровень $l = 3/2$ ($\xi = 0$).

В формуле (2.115) принято $a = 10^{-4}$ м$^{-1}$, $b = 0{,}9$. Соответствие выбранных уровней геометрическим высотам представлено в табл. 30.

Таблица 30

Соответствие выбранных уровней геометрическим высотам представлено

l	ξ	Z(м)	l	ξ	Z(м)
1	–0,1	–1176,58	4	0,5	8119,31
2	0,1	1176,58	5	0,7	15050,78
3	0,3	4049,65	6	0,9	∞

Диагностическая система решается для промежуточных точек горизонтальной сетки. Уравнения (2.117)–(2.119) записываются в конечных разностях по схеме Г.И. Марчука [117]. Методом обычной прогонки решается следующее трехточечное уравнение (подробный вывод приведен в работе [271]):

$$a_l\Gamma_{l-1} - b_l\Gamma_l + c_l\Gamma_{l+1} = F_l, \quad l = 2, 3, 4, 5, \qquad (2.121)$$

где $a_l = \dfrac{1}{\Delta\xi^2}\left(\pi_l - \dfrac{\Delta\xi}{2}\tilde{\alpha}_{l-1/2}\right)\tilde{\tilde{\alpha}}_{l+1/2}$; $\quad c_l = \dfrac{1}{\Delta\xi^2}\left(\pi_l + \dfrac{\Delta\xi}{2}\tilde{\alpha}_{l+1/2}\right)\tilde{\tilde{\alpha}}_{l-1/2}$;

$$b_l = a_l + c_l - \frac{1}{\chi - 1}\tilde{\tilde{\alpha}}_{l-1/2}\tilde{\tilde{\alpha}}_{l+1/2}; \quad F_l = \tilde{\tilde{\alpha}}_{l-1/2}\tilde{\tilde{\alpha}}_{l+1/2}\pi_l D_l - \Delta\xi\left(C_l\tilde{B}_{l+1/2} - a_l\tilde{B}_{l-1/2}\right).$$

Краевые условия согласно (2.116а) будут выглядеть следующим образом:

$$\Gamma_6 = 0; \quad \Gamma_2 = \Gamma_1 + \Delta\xi\tilde{B}_{3/2} - \tilde{\tilde{\alpha}}_{3/2}W_0\Delta\xi. \qquad (2.122)$$

Решение находится в точках 1, 2, 3, 4, 5, а $\Gamma_{3/2}$ определяется как среднее между Γ_1 и Γ_2. При практической реализации модели в правой части использовалась не чистая плоская дивергенция, а ее отклонение от среднего по вертикали значения. Эта операция на практике исключает не реальное развитие процессов, вызванное завышением роли дивергенции верхних уровней, ввиду выбранной вертикальной структуры сетки.

После того, как задача (2.121), (2.122), (2.123) будет решена, рассматривается прогностическая задача. Следуя работе [181], введем обозначения для конечных разностей:

$$A^{-x} = \frac{1}{2}\left(A_{i+1/2} + A_{i-1/2}\right); \quad A_x = \frac{1}{s}\left(A_{i+1/2} - A_{i-1/2}\right) \text{ и т.д.}$$

Запишем теперь прогностическую часть модели в следующем виде:

$$\bar{U}_t^{xy} + \overline{m\left(\bar{U}^{xy}\bar{U}_x^y + \bar{V}^{xy}\bar{U}_y^x\right)}^{xy} - \overline{\bar{V}^{xy}\left(l + \bar{U}^{xy}m_y\right)}^{xy} = -\overline{\frac{mC_P\tilde{T}}{\bar{\pi}^{xy}}\bar{\pi}_x^y}^{xy};$$

$$\bar{V}_t^{xy} + \overline{m\left(\bar{U}^{xy}\bar{U}_x^y + \bar{V}^{xy}\bar{U}_y^x\right)}^{xy} - \overline{\bar{U}^{xy}\left(l + \bar{U}^{xy}m_y\right)}^{xy} = -\overline{\frac{mC_P\tilde{T}}{\bar{\pi}^{xy}}\bar{\pi}_x^y}^{xy}; \qquad (2.123)$$

$$\bar{\pi}_t^{xy} + \overline{m\left(\bar{U}^{xy}\bar{\pi}_x^y + \bar{V}^{xy}\bar{\pi}_y^x\right)}^{xy} = \bar{\Gamma}^{xy}.$$

Область решения занимает ограниченную территорию с сеткой 24×20 точек с шагом $d = 381$ км на карте меркаторской проекции. На боковых границах ставятся краевые условия. Они являются неестественными и поэтому подбор соответствующих краевых процедур представляет собой трудную экспериментальную задачу. В результате большого числа экспериментов были получены наилучшие результаты с закрепленными (U, V, π – постоянны) краевыми значениями и с фильтрирующей процедурой, сглаживание применялось через каждые 2 часа по отношению к самим прогнозируемым величинам. На этом следует остановиться несколько подробнее. Формально сглаживание производилось по формулам [238]:

$$\bar{A} = A + \alpha\Delta A; \quad \bar{\bar{A}} = \bar{A} + \alpha\Delta\bar{A}, \qquad (2.124)$$

где $\Delta = ()_{i,j-1} + ()_{i,j+1} + ()_{i+1,j} + ()_{i-1,j} - 4()_{i,j}$.

Если рассмотреть только первый шаг этой процедуры, то он эквивалентен приближенному (одной итерации) учету горизонтально макротурбулентности в уравнениях системы (2.124). В зависимости, по отношению к каким полям делается сглаживание, можно говорить в данном случае, по полуявном учете горизонтальной макротурбулентности, если сглаживаются исходные поля, и по полуявном, если сглаживаются спрогнозированные поля. При этом

$$\alpha = \frac{\Delta t K}{d^2}.$$

При $\Delta t = 900$ с, $K = 10^6$ и $d = 381$ км должно быть $\alpha = 0{,}0066$. Практически использовалось $\alpha = 0{,}125$, но сглаживание применялось каждые 16 шагов. Суммарный эффект при этом получался одинаковый, а затраты машинного времени

меньше, чем если бы сглаживание производилось каждый шаг с $\alpha = 0{,}001$. Поскольку мы пользовались двушаговой процедурой, уменьшающей сглаживание волн размером большим, чем $2d$, то принятый процесс можно считать эквивалентным учету горизонтальной макротурбулентности с $K < 10^6$ м^2·с$^{-1}$.

Следует иметь также в виду, что в процессе прогноза из-за сильного влияния краев и несогласованности начальных данных, начинают проявляться гравитационные волновые возмущения, искажающие метеорологические поля, поэтому в модель введен переменный по времени средней дивергенции, скорости потока и орографии. Это достигалось путем выбора следующего выражения для α:

$$\alpha = \left(0{,}1 + 1{,}1 \cdot 10^6 (h + 300)\sqrt{U^2 + V^2}\right) VD(\xi), \tag{2.125}$$

где $VD(\xi)$ – эмпирическая функция высоты; h – высота земной поверхности в метрах.

На каждом шаге вычисляется средняя квадратичная дивергенция и в зависимости от ее величины изменяется чистота сглаживания с α, определенным по (2.125). Таким образом, в модели введена имитация переменного по x, y, ξ, t коэффициента горизонтальной турбулентности.

2.4.3. Учет приземного трения и орографии

Напряжение трения у земной поверхности определялось из формул

$$\tau^x_{3/2} = -\rho C_D |V| U_{3/2};$$

$$\tau^y_{3/2} = -\rho C_D |V| V_{3/2}. \tag{2.126}$$

Затем силы трения $\partial\tau^x/\partial\xi$ и $\partial\tau^y/\partial y$ для уровней $l = 3/2$ и $l = 2$ находятся следующем образом:

$$\left(\frac{\partial\tau^x}{\partial\xi}\right)_{3/2} = \frac{1}{0{,}1}\left(-\tau^x_{3/2}\right) = -10\tau^x_{3/2};$$

$$\left(\frac{\partial\tau^x}{\partial\xi}\right)_{2} = \frac{1}{0{,}2}\left(-\tau^x_{3/2}\right) = -5\tau^x_{3/2}.$$

При таком определении производных от функции, убывающей экспоненциально с высотой, получается большая ошибка, особенно на уровне $l = 2$. Из оценок модели Экмана следует, что:

$$\left(\frac{\partial\tau}{\partial\xi}\right)_2 \approx 0{,}2\left(\frac{\partial\tau}{\partial\xi}\right)_{3/2}. \tag{2.127}$$

Тогда для $l = 2$ получаем:

$$\left(\frac{\partial\tau}{\partial\xi}\right)_2 = 2\tau_{3/2}. \tag{2.128}$$

Так как сила поверхностного трения входит в уравнения движения в виде:

$$\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial\tau}{\partial z}\right)^{(x,y)}_{3/2} = \frac{a(b-\xi)}{\rho}\left(\frac{\partial\tau}{\partial\xi}\right)^{(x,y)}_{3/2};$$

то

$$\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial\tau}{\partial z}\right)^{(x,y)}_{3/2} = -\frac{9\cdot10^{-4}}{\rho}\tau^{(x,y)}_{3/2}; \tag{2.129}$$

$$\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial\tau}{\partial z}\right)^{(x,y)}_{2} = -\frac{8\cdot10^{-4}}{\rho}\tau^{(x,y)}_{3/2}. \tag{2.130}$$

Эти члены добавлялись в правые части уравнения движения для двух нижних уровней ($l = 3/2, 2$).

Кроме этого, учет поверхностного трения использовался для расчета вертикальных движений в планетарном пограничном слое.

Мы предполагаем, что в приземном слое действует только сила турбулентной вязкости и тогда из уравнения неразрывности следует приближенно

$$W_{\text{ТР}} = \frac{1}{\rho l}\left(\frac{\partial\tau^x}{\partial y} - \frac{\partial\tau^y}{\partial x}\right)_{3/2}. \tag{2.131}$$

Эта величина включается в краевое условие (2.122) в качестве части $\tilde{B}$. Другая часть относится к орографическим вертикальным движениям, которые находятся из выражения:

$$W_{\text{ТР}} = U_{3/2}\frac{\partial h}{\partial x} + V_{3/2}\frac{\partial h}{\partial y}, \tag{2.132}$$

где h – сглаженная высота земной поверхности в метрах.

Вычисляя W_{TP} по (2.131) и W_{OP} по (2.132), определяем:

$$W_O = W_{TP} + W_{OP}.$$

Таким образом, определяется приближенный учет орографии и приземного трения. Аналогичный прием применялся в ряде работающих прогностических зарубежных моделях и показал удовлетворительные результаты.

2.4.4. Полуявная схема реализации прогностической модели

Неявные временные разностные схемы получили наибольшее развитие в работах советских метеорологов еще в 60-х годах, когда ограниченные возможности эвм требовали применения экономических вычислительных методов для решения прогностических уравнений. К этому направлению следует отнести работы [162, 186] с баротропной моделью, и работы садокова и немчинова [163, 288], в которых обсуждались различные варианты реализации бароклинной модели по полным уравнениям. Один из этих вариантов близко совпадает с так называемой полунеявной схемой, предложенной вычислительным центром соан, где выполнен большой ряд работ по схемам расщепления, представляющим класс неявных схем [117].

В этом параграфе будет изложена полуявная схема в интерпретации Роберта [286]. Построим ее следующим образом. Диагностическая часть модели остается без изменения – по ней находится $\Gamma = \dfrac{dn\pi}{dt}$. После этого решается прогностическая часть. В работе принято, что неявно должны записываться все члены, описывающие среднее состояние атмосферы. В связи с этим обсуждается два варианта. Они отличаются формой представления π уравнениях.

В первом – в уравнениях движения вместо π используется значение $\ln \pi$. Во втором – используются те же параметры, что и в неявной схеме. Для удобства мы будем всюду пользоваться следующими обозначениями. Вариант модели, описанный в начале главы будем называть условно вариант $S-1$, указанные выше два варианта полунеявном схемы $S-2$ и $S-3$ соответственно.

Рассмотрим двухшаговый временный интервал $2\Delta t$, на котором представим уравнения следующем образом:

$$\overline{U_t^*}^t + \overline{\bar{u}}\,\overline{U_x^*}^{2t} - l_0\overline{V^*}^{2t} + \overline{RT_0\bar{\varphi}_x}^{2t} = -\left[\overline{\left(m^2U-u\right)}^{xy}\bar{U}_x^y + \overline{m^2V}^{xy}\bar{U}_y^x\right] +$$

$$+\bar{V}^{xy}\left(l' + \bar{U}^{xy}m_y\right) - R\left(\bar{m}^y\bar{T}^{xy} - T_0\right)\bar{\varphi}_x^{xy} = F^{(U} \;;$$

$$\overline{V_t^*}^t + \overline{\bar{u}}\,\overline{V_x^*}^{2t} - l_0\overline{U^*}^{2t} + \overline{RT_0\bar{\varphi}_x}^{2t} = -\left[\overline{\left(m^2U-u\right)}^{xy}\bar{V}_x^y + \overline{m^2V}^{xy}\bar{V}_y^x\right] -$$

$$-\bar{U}^{xy}\left(l' + \bar{U}^{xy}m_y\right) - R\left(\bar{m}^y\bar{T}^{xy} - T_0\right)\bar{\varphi}_y^{xy} = F^{(V} \;;$$

$$\overline{\varphi_t}^t + \overline{\bar{u}}\,\overline{\phi_x}^{2t} + \overline{U_x^*}^{2t} + \overline{V_x^*}^{2t} = -\left[\overline{\left(m^2U-u\right)}^{xy}\bar{\varphi}_x^y + \overline{m^2V}^{xy}\bar{\varphi}_y^x\right] +$$

$$-\overline{\left(\bar{U}_x^{\,y} + \bar{V}_y^{\,x}\right)}^{xy} + \overline{\left(\frac{\Gamma}{\pi}\right)}^{xy} = \Gamma^{(\phi)},$$

где $\varphi = \ln\pi$.

В последнем уравнении предполагается, что приближенно

$$\overline{U_t^*}^t + \overline{V_y^*}^{2t} = \left(\bar{U}_x^{\,y} + \bar{V}_y^{\,x}\right). \tag{2.133}$$

Это соотношение выполняется достаточно точно, в среднем, в принципе, оно соответствует записи:

$$\frac{dn\varphi}{dt} + D = \frac{\Gamma}{\pi} + D,$$

которое затем записывается на интервале $2\Delta t$ *с* введением центральных временных разностей с осреднением неявных членов по времени и записи явных слагаемых в центральной момент с осреднением по *x*, *y*.

Введем на рассматриваемом интервале обозначения:

$$\overline{U^*}^{2t} = \frac{1}{2}\left[U^*(t+\delta t) + U^*\left(t-\delta t\right)\right].$$

Тогда $\overline{U_t^*}^t = \frac{1}{\delta t}\left[U^{*2t} - U^*(t-\delta t)\right]$ и аналогично могут быть представлены $\overline{V_t^*}^t$ и $\overline{\varphi_t}^{2t}$. Величины U^*, V^* – значения U, V в середине квадратной сетки.

Левые части уравнений можно упростить, вводя новые переменные:

$$x_1 = x + \overline{\overline{u}}t; \quad y_1 = y; \quad t_1 = t.$$

При этом члены типа $u\,\partial A/\partial x$ пропадут и решать задачу можно как обычно, так как при $t = 0$ координатные системы совпадают. В конце прогноза результаты расчета необходимо сдвинуть вдоль потока на расстояние $\overline{\overline{u}}t$, где $\overline{\overline{u}}$ – средняя по всему району скорость, а t – срок прогноза.

Таким образом, мы приходим к следующей системе:

$$\overline{U^{*2t}} - \delta t l_0 \overline{V^{*2t}} + \delta t R T_0 \overline{\overline{\varphi}_x^y}^{2t} = \delta t F^{(U)} + U^*(t-\delta t) = A; \tag{2.134}$$

$$\overline{V^{*2t}} - \delta t l_0 \overline{U^{*2t}} + \delta t R T_0 \overline{\overline{\varphi}_y^x}^{2t} = \delta t F^{(V)} + V^*(t-\delta t) = B; \tag{2.135}$$

$$\overline{\varphi}^{2t} + \overline{\left(U_x^* + V_y^*\right)}^{2t} \delta t = \delta t F^{(\varphi)} + \varphi(t-\delta t) = C. \tag{2.136}$$

Подставляя $\tilde{r}$ и $\overline{V^{*2t}}$ в третье уравнение, получим:

$$\mu \Delta \overline{\varphi}^{2t} - \overline{\varphi}^{2t} = -C - \frac{\overline{A}_x^y + \overline{B}_y^x + \delta t l_0 \left(\overline{B}_x^y - \overline{A}_y^x\right)}{1 + \left(\delta t l_0\right)^2}, \tag{2.137}$$

где $\mu = \dfrac{\delta t R T_0}{\left(1 + \delta t^2 l_0^2\right) 2d^2}$.

Уравнение (2.137) представляет собой разностный аналог уравнения Гельмгольца, для решения которого применимы итерационные методы. После того, как уравнение (2.137) будет решено, определяются $\overline{U^{*2t}}$ и $\overline{V^{*2t}}$ по (2.134) и (2.135), а затем прогнозируемые величины:

$$\begin{aligned} U^*(t+\delta t) &= 2\overline{U^{*2t}} - U^*(t-\delta t); \\ V^*(t+\delta t) &= 2\overline{V^{*2t}} - V^*(t-\delta t); \\ \varphi(t+\delta t) &= 2\overline{\varphi}^{2t} - \varphi(t-\delta t). \end{aligned} \tag{2.138}$$

Значения $U(t+\delta t)$ и $V(t+\delta t)$ в основных узлах сетки находятся как средние по четырем окружающим значениям $U^*(t+\delta t)$ и $V^*(t+\delta t)$ соответственно.

На этом заканчивается цикл одного временного шага. Как показали практические расчеты, δt в этой схеме можно увеличить до 45 мин для ограниченной территории. Краевые условия использовались те же, что и для явной схемы.

Следует сделать некоторые замечания по поводу вычисления Г. В начале параграфа было сказано, что схема вычисления Г остается той же, что и для

явного метода. Поскольку для расчета надо знать π, то после каждого шага его надо определять из выражения $\pi = \exp(\varphi)$.

Это вносит определенные трудности, поэтому более экономично в схеме всюду использовать φ вместо π.

Обозначим $\tilde{\Gamma} = \dfrac{dn\pi}{dt}$, тогда для $\tilde{\Gamma}$ приходим к трехточечному уравнению типа (2.132), в котором:

$$a_l = \left[a\left(b-\xi_{l-1/2}\right) - \frac{\Delta\xi}{2}\left(a-\alpha^{(2)}_{l-1/2}\right)\right]\frac{2-\varphi_l+\varphi_{l-1}}{2\Delta\xi\alpha^{(1)}_{l-1/2}};$$

$$c_l = \left[a\left(b-\xi_{l+1/2}\right) - \frac{\Delta\xi}{2}\left(a-\alpha^{(2)}_{l+1/2}\right)\right]\frac{2+\varphi_{l+1}-\varphi_l}{2\Delta\xi\alpha^{(1)}_{l+1/2}};$$

$$b_l = \left[a\left(b-\xi_{l-1/2}\right) - \frac{\Delta\xi}{2}\left(a-\alpha^{(2)}_{l-1/2}\right)\right]\frac{2+\varphi_{l+1}+\varphi_l}{2\Delta\xi\alpha^{(1)}_{l-1/2}} +$$

$$+\left[a\left(b-\xi_{l+1/2}\right) - \frac{\Delta\xi}{2}\left(a-\alpha^{(2)}_{l+1/2}\right)\right]\frac{2-\varphi_{l+1}-\varphi_l}{2\Delta\xi\alpha^{(1)}_{l+1/2}} + \frac{\Delta\xi}{\chi-1};$$

$$\tilde{B} = \frac{\partial U}{\partial\xi}\frac{\partial\varphi}{\partial x} - \frac{\partial V}{\partial\xi}\frac{\partial\varphi}{\partial y};$$

$$\alpha^{(1)} = \frac{1}{a(b-\xi)}\left\{a^2(b-\xi)^2\left[\frac{\partial^2\varphi}{\partial\xi^2} + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\xi}\right)^2\right] - a^2(b-\xi)\frac{\partial\varphi}{\partial\xi}\right\};$$

$$\alpha^{(2)} = \frac{a(b-\xi)}{\chi-1}\frac{\partial\varphi}{\partial\xi}.$$

На верхней границе вместо (2.133) ставится условие:

$$\left(\tilde{\Gamma}\Big/\alpha^{(1)}\right)_L = 0.$$

Нетрудно оценить, что $\tilde{\Gamma}\Big/\alpha^{(1)}$ стремится на бесконечности к нулю как $(b-\xi)^2$. Чтобы это условие было выполнено, достаточно потребовать в разностном уравнении для $\tilde{\Gamma}$:

$$C_{L-1} = 0.$$

На нижней границе условие записывается следующим образом:

$$\frac{\partial\tilde{\Gamma}}{\partial\xi} + \frac{\partial\varphi}{\partial\xi}\tilde{\Gamma} + \alpha^{(1)}W = \tilde{B}.$$

Интегрируя это выражение в пределах $\{\xi_l, \xi_{l+1}\}$ и беря $l = 1$, получим:

$$\tilde{\Gamma}_1 = \frac{2+\varphi_2-\varphi_1}{2-\varphi_2+\varphi_1}\tilde{\Gamma}_2 + \frac{2\left(\Delta\xi\alpha^{(1)}_{3/2}W_0 - \Delta\xi\tilde{B}_{3/2}\right)}{2-\varphi_2+\varphi_1}. \qquad (2.139)$$

Отсюда следует, что:

$$P_2 = \frac{2+\varphi_2-\varphi_1}{2-\varphi_2+\varphi_1};\quad Q_2 = \frac{2\Delta\xi}{2-\varphi_2+\varphi_1}\left(\alpha^{(1)}_{3/2}W_0 - \tilde{B}_{3/2}\right).$$

Таким образом, мы свели задачу к полунеявной разностной схеме, в которой основными параметрами являются поля скоростей и функция $\varphi = \frac{\chi-1}{\chi}\ln\frac{p}{1000}$. Переходим к обсуждению второго подхода. Отметим принципиальные отличия его от предыдущих вариантов. Они сводятся к тому, что во всех уравнениях рассматривается только π и его производные. В уравнениях движения член типа π представляется следующим образом:

$$\frac{RT_0(\xi)}{\overline{\pi}^{xy}}\overline{\pi}^{y}_{x};\quad \frac{RT_0(\xi)}{\overline{\pi}^{xy}}\overline{\pi}^{x}_{y} \text{ и } \frac{\partial\pi}{\partial t}+\frac{\partial U\pi}{\partial x}+\frac{\partial V\pi}{\partial y} = \Gamma + \pi D. \tag{2.140}$$

Проделывая обработку уравнений, подобно предыдущему варианту, приходим к разностной системе:

$$\begin{gathered}
\overline{U^*}^{2t} - \delta t l_0 \overline{V^*}^{2t} + \delta t R T_0 \overline{\left(\frac{\overline{\pi}^{y}_{x}}{\overline{\pi}^{xy}}\right)}^{2t} = A;\\
\overline{V^*}^{2t} + \delta t l_0 \overline{U^*}^{2t} + \delta t R T_0 \overline{\left(\frac{\overline{\pi}^{x}_{y}}{\overline{\pi}^{xy}}\right)}^{2t} = B;\\
\overline{\pi} + \overline{\left(\overline{U^*\overline{\pi}^{xy}}\right)^{y}_{x}}^{2t} + \overline{\left(\overline{V^*\overline{\pi}^{xy}}\right)^{x}_{y}}^{2t} = C.
\end{gathered} \tag{2.141}$$

Умножая первое и второе уравнения на $\overline{\overline{\pi}^{xy}}^{2t}$ и подставляя $U^*\overline{\pi}^{xy}$ и $V^*\overline{\pi}^{xy}$ в третье уравнение, приходим к следующему уравнению для определения $\overline{\pi}^{2t}$ в узлах сетки:

$$\mu\Delta\overline{\pi}^{2t} - \overline{\pi}^{2t} = -C - \frac{1}{1+\left(\delta t l_0\right)^2}\times$$

$$\times\left\{(\overline{A\overline{\pi}^{xy}})^{y}_{x} + \overline{(B\overline{\pi}^{xy})^{x}_{y}} + \delta t l_0\left[\overline{(B\overline{\pi}^{xy})^{y}_{x}} - \overline{(A\overline{\pi}^{xy})^{x}_{y}}\right]\right\},$$

где $C = \overline{\Gamma}^{xy} + \overline{\left[\overline{\pi}^{xy}\left(\overline{U}^{y}_{x} + \overline{V}^{x}_{y}\right)\right]}^{xy} - \overline{U^*(t-\delta t)}^{xy}$.

Остальные процедуры остаются прежними. Г вычисляется по схеме применяемой в явном варианте.

Из всех подходов к реализации полунеявной схемы была выбрана последняя, которая более сравнима с явной схемой и легко приспосабливается к ней с точки зрения программирования задачи.

2.4.5. Организация оперативных расчетов. Результаты испытания

Описанная модель $S-1$ вначале была проверена на тестовом расчете с искусственными начальными данными. Расчет проводился с циклическими краевыми условиями по x и давал реалистические результаты в течение 3-х суток прогноза.

Для определения начального поля π на фиксированных геометрических уровнях, вводились данные геопотенциальных высот на стандартных изобарических поверхностях 1000, 700, 500, 300 и 100 мбар. Эти данные интерполировались на стандартные высоты модели с помощью квадратичной интерполяции. Результаты прогнозов для удобства анализа и использования затем опять переинтерполировались на стандартные изобарические поверхности. Прогностические карты геопотенциала выдаются на 5 поверхностях: 1000, 700, 500, 300, 1000 мбар и горизонтальных составляющих ветра на высотах: уровень моря, 1, 4, 8, 15 км.

Модель глобальной циркуляции основана на системе примитивных уравнений гидротермодинамики в квазистатическом приближении. Уравнения те же, что и для предыдущей модели, но записаны в сферических координатах [169]:

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{U}{a\sin\theta}\frac{\partial U}{\partial\lambda}+\frac{V}{a}\frac{\partial U}{\partial\theta}+\tilde{W}\frac{\partial U}{\partial\xi}-2\omega\cos\theta V+\frac{UV}{a}\operatorname{ctg}\theta=-\frac{C_pT}{a\sin\theta}\frac{\partial\ln\pi}{\partial\lambda}; \quad (2.142)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{U}{a\sin\theta}\frac{\partial V}{\partial\lambda}+\frac{V}{a}\frac{\partial V}{\partial\theta}+\tilde{W}\frac{\partial V}{\partial\xi}+2\omega\cos\theta U+\frac{U^{@}}{a}\operatorname{ctg}\theta=-\frac{C_pT}{a}\frac{\partial\ln\pi}{\partial\theta}; \quad (2.143)$$

$$\frac{\partial\pi}{\partial t}+\frac{U}{a\sin\theta}\frac{\partial\pi}{\partial\lambda}+\frac{V}{a}\frac{\partial\pi}{\partial\theta}=\Gamma; \quad (2.144)$$

$$\frac{\partial\Gamma}{\partial\xi}+\alpha^{(1)}\tilde{W}=B-\frac{\partial\pi}{\partial\xi}\varepsilon; \quad (2.145)$$

$$\pi\frac{\partial\tilde{W}}{\partial\xi}+\alpha^{(2)}\tilde{W}+\frac{\Gamma}{\chi-1}=-\pi(D-\varepsilon); \quad (2.146)$$

$$\frac{\partial\pi}{\partial\xi}=\frac{g\pi}{C_pT\tilde{a}(b-\xi)}, \quad (2.147)$$

где λ, θ – долгота и дополнение до широты места; U, V – горизонтальные компоненты ветра; U – направлена к востоку; V – к северу.

Остальные обозначения остаются прежними и, кроме того,

$$\alpha^{(1)}=\frac{\partial^2\pi}{\partial\xi^2}-\frac{1}{b-\xi}\frac{\partial\pi}{\partial\xi}=\frac{\gamma_a-\gamma}{T}\frac{\partial\pi}{\partial\xi}\frac{1}{\tilde{a}(b-\xi)}; \quad (2.148)$$

$$\alpha^{(2)}=\frac{1}{\chi-1}\frac{\partial\pi}{\partial\xi}+\frac{\pi}{b-\xi}, \quad (2.149)$$

где γ_a, γ – адиабатический и обычный вертикальные градиенты температуры, $\tilde{a}=10^{-4}$ м$^{-1}$;

$$B=\frac{\partial U}{\partial\xi}\frac{1}{a\sin\theta}\frac{\partial\pi}{\partial\lambda}+\frac{1}{a}\frac{\partial\pi}{\partial\theta}\frac{\partial V}{\tilde{a}\partial\xi}; \quad (2.150)$$

$$D = \frac{1}{a\sin\theta}\left(\frac{\partial U}{\partial\lambda} + \frac{\partial V\sin\theta}{\partial\theta}\right); \tag{2.151}$$

$$\varepsilon = \frac{\tilde{a}(b-\xi)\partial U}{\rho C_P \chi T}\frac{\partial H}{\partial\xi} + \varepsilon_R. \tag{2.152}$$

где H – турбулентный поток тепла; ε_R – внешние притоки тепла за счет радиации и других источников.

По вертикали система требует двух условий. Выберем их следующим образом:

$$\Gamma \to 0 \text{ при } \xi = 0{,}9 \ (z \to \infty);$$

$$W = W_0(\theta, \lambda) \text{ при } \xi = 0 \ (z = 0).$$

Здесь $W_0(\theta, \lambda)$ представляют собой вертикальные движения у земной поверхности, обусловленные орографическими и фрикционными эффектами и определяются аналогично (2.131) и (2.132).

Решение ищется на сферической сетке точек с параметрами $\Delta\lambda = 10°$ и $\Delta\theta = 7{,}5°$. По вертикали точки располагается так, как показано на рис. 2.3. Основные функции: U, V и π определены в основных узлах сетки. Значения $\tilde{W}$ определяются на дробных уровнях. Основные уровни $l = 1, 2, 3, 4, 5$ располагаются на геометрических высотах 0; 1176; 4050; 8119 и 15051 м соответственно.

Рассмотрим вначале диагностическую часть. Конечно-разностное представление уравнений (2.145) и (2.146) делается аналогично тому, как сделано для локальной модели. В результате получаются по l трехточечное уравнение следующего вида:

$$a_l\Gamma_{l-1} - b_l\Gamma_l + c_l\Gamma_{l+1} = F_l, \quad l = 2, 3, 4, 5, \tag{2.153}$$

где $a_l = \frac{1}{\Delta\xi^2}\left(\pi_l - \frac{\Delta\xi}{2}\alpha^{(2)}_{l-1/2}\right)\alpha^{(1)}_{l+1/2}$; $c_l = \frac{1}{\Delta\xi^2}\left(\pi_l + \frac{\Delta\xi}{2}\alpha^{(2)}_{l+1/2}\right)\alpha^{(1)}_{l-1/2}$;

$$b_l = a_l + c_l + \frac{1}{\chi - 1}\alpha^{(1)}_{l-1/2}\alpha^{(1)}_{l+1/2};$$

$$F_l = \alpha^{(1)}_{l-1/2}\alpha^{(1)}_{l+1/2}\pi_l D_l + \Delta\xi\left(C_l B_{l+1/2} - a_l B_{l-1/2}\right) - c'_l\varepsilon_{l+1/2} - a'_l\varepsilon_{l-1/2},$$

где $c'_l = \alpha^{(1)}_{l+1/2}\alpha^{(1)}_{l-1/2}\frac{\pi_l}{2} + c_l(\pi_{l+1} - \pi_l)$; $a'_l = \alpha^{(1)}_{l+1/2}\alpha^{(1)}_{l-1/2}\frac{\pi_l}{2} - a_l(\pi_l - \pi_{l-1})$.

Краевые условия, согласно (2.153), будут выглядеть методом прогонки. Решения находятся на уровнях $l = 1, 2, 3, 4, 5$ в центрах горизонтальной сетки.

Определим конечно-разностную аппроксимацию дифференциальных операторов B и D. Нумерацию точек по λ будем осуществлять с запада на восток и обозначать индексом i, а по θ – с севера на юг и обозначать буквой j. Введем обозначения:

$$A_\lambda = A_{i+1/2,j} - A_{i-1/2,j}; \quad A_\theta = A_{i,j-1/2} - A_{i,j+1/2};$$

$$\overline{A}^\lambda = \frac{1}{2}\left(A_{i+1/2,j} + A_{i-1/2,j}\right); \quad \overline{A}^\theta = \frac{1}{2}\left(A_{i,j+1/2} + A_{i,j-1/2}\right). \tag{2.154}$$

Кроме этого, обозначим:

$$f_j = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}\frac{1}{\overline{\sin\theta_j}^{\theta}}.$$

Тогда для B и D можно записать:

$$B_{i+1/2,j-1/2,l-1/2} = \frac{1}{a\Delta\theta\Delta\xi}\left[\bar{U}_{\xi}^{\lambda\theta} f_{j-1/2}\bar{\pi}_{\lambda}^{\theta\xi} + \bar{V}_{\xi}^{\lambda\theta}\bar{\pi}_{\theta}^{\lambda\xi}\right]; \tag{2.155}$$

$$D_{i+1/2,j-1/2,l} = \frac{f_{j-1/2}}{a\Delta\theta}\left[\bar{U}_{\lambda}^{\theta} + \overline{\left(\frac{V}{f}\right)_{\theta}}^{\lambda}\right]. \tag{2.156}$$

Опишем методику вычисления вертикальных движений воздуха. Наиболее простой путь определения $\tilde{W}$ основан на использовании уже вычисленных значений Γ с помощью уравнения (2.146). Запишем это уравнение в целых точках l следующим образом:

$$\pi_l\frac{\tilde{W}_{l+1/2}-\tilde{W}_{l-1/2}}{\Delta\xi} + \frac{1}{2}\left(\alpha_{l+1/2}^{(2)}\tilde{W}_{l+1/2} + \alpha_{l-1/2}^{(2)}\tilde{W}_{l-1/2}\right) + \\ + \frac{\Gamma_l}{\chi-1} = -\pi_l D_l + \frac{\pi_l}{2}\left(\varepsilon_{l+1/2} + \varepsilon_{l-1/2}\right).$$

Отсюда:

$$\tilde{W}_{l+1/2} = \frac{2\pi_l - \Delta\xi\alpha_{l-1/2}^{(2)}}{2\pi_l + \Delta\xi\alpha_{l-1/2}^{(2)}}\tilde{W}_{l-1/2} - \\ - \frac{1}{2\pi_l + \Delta\xi\alpha_{l-1/2}^{(2)}}\left[\frac{\Delta\xi}{\chi-1}\frac{\Gamma_l}{\pi_l} + D_l - \frac{\Delta\xi}{2}\left(\varepsilon_{l+1/2} + \varepsilon_{l-1/2}\right)\right]. \tag{2.157}$$

Краевое условие ставится на нижнем, первом дробном уровне $l = 3/2$. Предполагается, что вертикальная скорость на этом уровне складывается из фрикционных и орографических движений.

Перейдем к рассмотрению эволюционной задачи. Уравнения (2.142), (2.143) и (2.144) обрабатываются следующим образом. В левую часть переносятся члены с частной производной по времени и все линейные члены, которые представляются как средние по времени выражения на интервале $2\Delta t$. Левая часть уравнений записывается в центральный момент времени и усредняется по четырем окружающим точкам. В результате такой обработки получим:

$$\bar{U}_t^t - l_o\bar{V}^{2t} - \frac{C_P T_0 f_j}{a\Delta\theta}\frac{\overline{\bar{\pi}_{\lambda}^{\theta}}^{2t}}{\bar{\pi}^{\theta\lambda}} = \overline{F^{(U)}}^{\theta\lambda}; \\ \bar{V}_t^t - l_o\bar{U}^{2t} - \frac{C_P T_0}{a\Delta\theta\bar{\pi}^{\theta\lambda}}\overline{\bar{\pi}_{\lambda}^{\theta}}^{2t} = \overline{F^{(V)}}^{\theta\lambda}; \tag{2.158}$$

$$\overline{\pi}_t^t = \overline{F^{(\pi)}}^{\theta\lambda},$$

где l_0 – параметр Кориолиса при $\theta = 45°$; T_0 – средняя температура в атмосфере.

$$F^{(U)}_{i+1/2,j-1/2} = -\frac{1}{a\Delta\theta}\left(\overline{U}^{\theta\lambda} f_{j-1/2}\overline{U}^{\theta}_{\lambda} + \overline{V}^{\theta\lambda}\overline{U}^{\lambda}_{\theta} + \overline{\tilde{W}\overline{U}^{\theta\lambda}_{\xi}}^{\xi}\right) -$$

$$-\left(l_{j-1/2} - l_0\right)\overline{V}^{\theta\lambda} - \frac{C_P f_{j-1/2}}{a\Delta\theta}(T - T_0)\frac{\overline{\pi^{\theta}_{\lambda}}}{\overline{\pi}^{\theta\lambda}};$$

$$F^{(V)}_{i+1/2,j-1/2} = -\frac{1}{a\Delta\theta}\left(\overline{U}^{\theta\lambda} f_{j-1/2}\overline{V}^{\theta}_{\lambda} + \overline{V}^{\theta\lambda}\overline{V}^{\lambda}_{\theta} + \overline{\tilde{W}\overline{U}^{\theta\lambda}_{\xi}}^{\xi}\right) -$$

$$-\left(l_{j-1/2} - l_0\right)\overline{U}^{\theta\lambda} - \frac{C_P}{a\Delta\theta}(T - T_0)\frac{\overline{\overline{\pi^{\theta}_{\lambda}}}}{\overline{\pi}^{\theta\lambda}};$$

$$F^{(\pi)}_{i+1/2,j-1/2} = -\frac{1}{a\Delta\theta}\left(\overline{U}^{\theta\lambda} f_{j-1/2}\overline{\pi}^{\theta}_{\lambda} + \overline{V}^{\theta\lambda}\overline{\pi}^{\lambda}_{\theta}\right) + \Gamma_{i+1/2,j-1/2},$$

где $$\overline{U}^{2t} = \frac{1}{2}\left(U^{(n+1)} + U^{(n-1)}\right);\quad \overline{U}^{t}_{t} = \frac{1}{2\Delta t}\left(U^{(n+1)} - U^{(n-1)}\right). \qquad (2.159)$$

Из (2.159) следует, что:

$$\overline{U}^{t}_{t} = \frac{1}{\Delta t}\left(\overline{U}^{2t} - U^{(n-1)}\right).$$

Подставим это выражение в уравнения системы (2.169). Тогда:

$$\overline{U}^{2t} + \delta\overline{V}^{2t} = -C_1 f_j \frac{\overline{\pi^{\theta}_{\lambda}}^{2t}}{\overline{\pi}^{\theta\lambda}} + \Delta t\overline{F^{(U)}}^{\theta\lambda} + U^{(n-1)} = A_1;$$

$$\overline{V}^{2t} + \delta\overline{V}^{2t} = -C_1 \frac{\overline{\pi^{\lambda}_{\theta}}^{2t}}{\overline{\pi}^{\theta\lambda}} + \Delta t\overline{F^{(V)}}^{\theta\lambda} + V^{(n-1)} = A_2;$$

$$\overline{\pi}^{2t} = \Delta t\overline{F^{(\pi)}}^{\theta\lambda} + \pi^{(n-1)} = C,$$

где $\delta = l_0\Delta t$; $C_1 = \dfrac{C_P T_0}{a\Delta\theta}\Delta t.$

Первые два уравнения решаются относительно $\overline{U}^{2t}$ и $\overline{V}^{2t}$ с использованием вместо π его значения из третьего уравнения. В итоге получим:

$$\overline{U}^{2t} = \frac{1}{1+\delta^2}\left[A_1 + A_2\delta - \frac{C_1}{\overline{\pi}^{\theta\lambda}}\left(\overline{C}^{\theta}_{\lambda} f_j + \overline{C}^{\lambda}_{\theta}\delta\right)\right];$$

$$\overline{V}^{2t} = \frac{1}{1+\delta^2}\left[A_2 - A_1\delta - \frac{C_1}{\overline{\pi}^{\theta\lambda}}\left(\overline{C}^{\lambda}_{\theta} + f_j\overline{C}^{\theta}_{\lambda}\right)\right]. \qquad (2.160)$$

После этого определяются:

$$U^{(n+1)} = 2\overline{U}^{2t} - U^{(n+1)}; \quad V^{(n+1)} = 2\overline{V}^{2t} - V^{(n+1)}; \quad \pi^{(n+1)} = 2\overline{\pi}^{2t} - \pi^{(n+1)}.$$

Значения метеоэлементов на полюсе, который представлен в модели 36 точками, вычисляются по методике Курихара. Значение π на полюсе находится как среднее значение на ближайшей широте. Всем 36 точкам «полюса» приписывается это значение. Ветер на 36 точках «полюса» вычисляется следующим образом. Вектора скоростей на ближайшей широте ($j = 2$) в каждой точке векторно переносятся в полюс, складываются и усредняются. Полученный таким образом результирующий вектор затем снова проектируется в 36 точках «полюса» на направление λ и на проходящее через каждую точку направление меридиана. Полученные таким образом компоненты U, V в 36 точках, представляющие полюс, используются затем в дальнейших расчетах.

Для ликвидации линейной неустойчивости, возникающей вблизи полюса из-за большого числа точек вдоль круга широт, применялась процедура фильтрации вдоль круга широт, в которой число от фильтрованных гармоник обратно пропорционально $\frac{3}{4}\sin\theta$.

Динамический орографический эффект осуществляется через вертикальные движения. Орографические вертикальные движения вычисляются из выражения $W_{\text{ор}} = \frac{U}{a\sin\theta}\frac{\partial h}{\partial\lambda} + \frac{V}{a}\frac{\partial h}{\partial\theta}$, в конечных разностях принимает вид:

$$(W_{\text{ор}})_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} = \frac{1}{a\Delta\theta}\left(\overline{U}^{\theta\lambda} f_{j-\frac{1}{2}} \overline{h}_{\lambda}^{\theta} + \overline{V}^{\theta\lambda} \overline{h}_{\theta}^{\lambda}\right). \tag{2.161}$$

Вертикальные движения за счет трения о поверхность Земли находятся из выражения:

$$W_{\text{тр}} = \frac{1}{\rho l}\left(\frac{1}{a}\frac{\partial\tau^{(\lambda)}}{\partial\theta} - \frac{1}{a\sin\theta}\frac{\partial\tau^{(\theta)}}{\partial\lambda}\right), \tag{2.162}$$

где

$$\tau^{(\lambda)} = -\rho C_D\sqrt{U^2+V^2}U = -\rho\tau_*^{(\lambda)}; \tag{2.163}$$

$$\tau^{(\theta)} = -\rho C_D\sqrt{U^2+V^2}V = -\rho\tau_*^{(\theta)};$$

ρ – плотность воздуха.

Скорость ветра в (2.163) берется на уровне моря. Конечно-разностный аналог выражения (2.162) с учетом (2.163) имеет вид:

$$(W_{\text{тр}})_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} = \frac{1}{a\Delta\theta\, l_{j-\frac{1}{2}}}\left(f_{j-\frac{1}{2}} \overline{h}_{\lambda}^{\theta} + \overline{V}^{\theta\lambda} \overline{h}_{\theta}^{\lambda}\right). \tag{2.164}$$

Здесь $l_{j-\frac{1}{2}}$ – переменная для всех $j < 8$ и $l_{j-\frac{1}{2}} = l_{8-\frac{1}{2}}$ для $j \geq 8$. Вычисленные значения $W_{\text{тр}}$ и $W_{\text{ор}}$ приписываются уровню $l = \frac{3}{2}$ и складываются.

Таким образом,

$$(W_O)_{i+1/2,j-1/2} = \frac{1}{a\Delta\theta\, l_{j-1/2}}\left(f_{j-1/2}\overline{\left(\overline{\tau_*^{(\theta)}}\right)_\lambda}^{0} - \overline{\left(\overline{\tau_*^{(\lambda)}}\right)_\theta}^{\lambda}\right). \tag{2.165}$$

Помимо воздействия на вертикальные движения, трение о земную поверхность оказывает свое действие на вектор горизонтального ветра. Сила трения в уравнениях горизонтального движения определяется на двух уровнях: уровне моря и следующем счетном уровне. Как известно, сила поверхностного трения входит в уравнения движения в виде:

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial\vec{\tau}}{\partial z} = \frac{\tilde{a}(b-\xi)}{\rho}\frac{\partial\vec{\tau}}{\partial\xi} = -\tilde{a}(b-\xi)\frac{\partial\vec{\tau}_*}{\partial\xi}. \tag{2.166}$$

Из оценок модели Экмана следует, что приблизительно:

$$\left(\frac{\partial\vec{\tau}}{\partial\xi}\right)_1 = 5\left(\frac{\partial\vec{\tau}}{\partial\xi}\right)_2, \quad \text{а} \left(\frac{\partial\vec{\tau}}{\partial\xi}\right)_2 = \frac{0-\vec{\tau}_1}{0{,}2} = -5\vec{\tau}_1 = -5\rho\vec{\tau}_*.$$

Тогда $\left(\dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial\vec{\tau}}{\partial z}\right)_1 = 22{,}5\cdot 10^{-4}\vec{\tau}_*;$

$$\left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial\vec{\tau}}{\partial z}\right)_2 = 4\cdot 10^{-4}\vec{\tau}_*, \tag{2.167}$$

где $\vec{\tau}_*$ определяется по формулам (2.163).

Полученные дополнительные слагаемые добавляются в правые части уравнений (2.158).

В экспериментах с орографией и трениям предполагалось, что коэффициент сопротивления C_D на суше зависит от высоты гор следующим образом:

$$C_D = (1+0{,}0025\,h)\cdot 10^{-3}, \tag{2.168}$$

где h – высота горы в метрах.

Над океаном используются эмпирические соотношения работы [172]:

$$C_D = \begin{cases} \dfrac{C_D^*}{\left(|V|_1\right)^{0,2}}, & |V| \le 1\ m\cdot c^{-1}; \\ 0{,}4C_D^*\sqrt{|V|_1}, & 1 < |V| \le 15\ m\cdot c^{-1}; \\ 2C_D^*, & |V| > 15\ m\cdot c^{-1}, \end{cases} \tag{2.169}$$

где $C_D^* = 1{,}25\cdot 10^{-3}$.

2.4.6. Учет турбулентного обмена между океаном и атмосферой

Турбулентный поток от поверхности океана определялся из выражения:

$$H_s = -\rho C_P C_D \,|V|\,(T_1 - T_s), \tag{2.170}$$

где T_1 – температура воздуха на уровне моря; T_s – температура поверхности океана.

Коэффициент сопротивления C_D определялся согласно соотношениям (2.169). Затем было сделано предположение, что турбулентный поток убывает с высотой по следующему закону:

$$H_l = H_s\left(\frac{4-l}{3}\right)^2, \tag{2.171}$$

где l – номера расчетных уровней.

Из этого закона следует, что поток тепла распространяется только до уровня $l = 3$ (4 км).

Напомним, что в расчетные формулы входит величина:

$$\varepsilon = -\frac{1}{\rho C_P \chi T}\frac{\partial H}{\partial z}. \tag{2.172}$$

Если мы распишем (2.172) в конечных разностях для дробных уровней, имея в виду (2.171), то тогда получим:

$$\varepsilon_{3/2} = 0{,}56\tilde{H}_s; \quad \varepsilon_{5/2} = 0{,}136\tilde{H}_s; \quad \varepsilon_{7/2} = 0{,}032\tilde{H}_s; \quad \varepsilon_{9/2} = 0, \tag{2.173}$$

где $\tilde{H}_s = c_3 \,|V|\,\Delta T; \quad C_3 = \dfrac{C_D}{\chi T_{\text{ср}} \Delta z_{3/2}}; \quad \Delta T = T_s - T_1.$ (2.174)

Температура воздуха на уровне моря связана с вышележащим удобным уровнем, если известен вертикальный ее градиент. Тогда:

$$T_1 = T_{3/2} + \gamma\frac{\Delta z_{3/2}}{2}, \tag{2.175}$$

где для γ взята в наших расчетах величина 0,006 град·м$^{-1}$.

Более точно значение ΔT можно определить, если привлечь условие теплового баланса на поверхности океана. Однако в данных экспериментах мы предполагали следующую связь:

$$T_1 = \frac{T_{3/2}}{\pi_{3/2}}. \tag{2.176}$$

Температура в океане в приведенных экспериментах считалась заданной в течение всего времени счета.

Как это было видно из системы уравнений (2.142)–(2.144), в ней температура не прогнозируется, а может быть вычислена по полю давления из уравнения гидростатики (2.147), которое после интегрирования в слое $\{z_l, z_{l-1}\}$ имеет вид:

$$T_{l-1/2} = \frac{g \ln\left(\dfrac{b-\xi_l}{b-\xi_{l-1}}\right)}{C_p \tilde{a} \ln\left(\dfrac{\pi_l}{\pi_{l-1}}\right)}, \tag{2.177}$$

где $T_{l-1/2}$ – средняя температура слоя $\{z_l, z_{l-1}\}$.

В результате орографических и термических воздействий термическая структура модели может так измениться, что окажется неустойчивой. Для удержания модели вблизи некоторого нейтрального состояния вводится процедура приспособления. В этой процедуре решается уравнение (2.102) с краевыми условиями:

$$\pi^*|_{z=0} - \text{задано},$$

$$\pi^*|_{z=\ddot{y}_a} = \tilde{\pi}_0 - \text{задано}. \tag{2.178}$$

Выражение (2.100) можно с учетом (2.198) представить в виде:

$$\tilde{\pi}_l = \tilde{\pi}_{l-1}\left(\frac{\tilde{T}_{l-1} - \left(\tilde{\gamma}\Delta z\right)_{l-1/2}}{\tilde{T}_{l-1}}\right)^{\gamma_a/\tilde{\gamma}_{l-1/2}}; \tag{2.179}$$

$$\tilde{\pi}_1 = \pi_1; \quad \tilde{T}_1 = \frac{T_{3/2}}{\pi_{3/2}}; \quad \pi_{3/2} = \frac{1}{2}\left(\pi_1 + \pi_2\right).$$

Задачу (2.102), (2.178) удобно записать следующим образом:

$$\frac{d}{dz}K\frac{d\pi'}{dz} - \sigma\pi' = f';$$

$$\pi' = 0 \text{ при } z = 0; \tag{2.180}$$

$$\pi' = 0 \text{ при } z = \infty;$$

где $\pi' = \pi^* - \tilde{\pi}$; $\quad \sigma = \dfrac{1}{\delta t}$; $\quad f' = -\sigma\left(\pi - \tilde{\pi}\right)$.

Задача (2.180) решается в точках, где хотя бы на одном уровне выполняется условие:

$$\gamma_l = \frac{T_{l-1/2} - T_{l+1/2}}{\Delta z_l} > \tilde{\gamma}_l. \tag{2.181}$$

2.4.7. Вычислительная экспериментальная проверка алгоритмов, описывающих динамический эффект орографии и трения

Описанные выше алгоритмы были проверены на модельных экспериментах. В качестве исходных данных было принято зональное распределение метеоэлементов. Зональный ветер определялся из формулы:

$$U = a\alpha \sin^2 \theta, \tag{2.182}$$

а функция давления из выражения:

$$\pi = \exp\left[\frac{\omega a^2 \alpha(z)\left(\frac{4}{3} - \cos\theta - \frac{\cos 3\theta}{3}\right) - g z_{\text{ст}}}{c_p T(z)}\right], \tag{2.183}$$

где $\alpha(z)$ – индекс циркуляции атмосферы; $Z_{\text{ст}}$ – высота основных уровней модели; $z_{\text{ст}}a$ – радиус Земли; $T(z)$ – среднее значение температуры.

Для α были взяты значения $\alpha(0) = 10^{-6}$; $\alpha(1\text{ км}) = 2\cdot10^{-6}$; $\alpha(4\text{ км}) = 3\cdot10^{-6}$; $\alpha(8\text{ км}) = 4\cdot10^{-6}$; $\alpha(15\text{ км}) = -10^{-7}$.

Расчеты проводились с временным шагом $\Delta t = 30$ мин. Продолжительность экспериментов составляла около 30 суток. Эксперименты позволили установить специфические закономерности в поведении модели и выбрать оптимальные параметры. Особенно это относилось к процессу фильтрации.

Явление обтекания Тибетского массива впервые было обнаружено Рахманатаном и затем смоделировано стационарной линейной моделью Ш.А. Мусаелян [132, 133], Г.П. Курбаткиным [89]. Однако, обтекание в этих районах было не ярко выраженным.

2.4.8. Расчет радиационного притока тепла

Радиационный приток тепла для глобального варианта предполагается рассчитывать по модели «серой» атмосферы с использованием схемы Марчука [117]. Эта схема предусматривает прямое численное интегрирование уравнении радиационного переноса, в отличие от методов использующих функции пропускания [284]. Уравнения переноса длинноволновой радиации представляются в конечных разностях относительно дивергенции радиационных потоков $u = F^{\uparrow} + F^{\downarrow}$, где $F^{\uparrow}$, $F^{\downarrow}$ – радиационные потоки снизу и сверху, соответственно. Получающееся при этом разностное уравнение имеет трехточечную структуру и решается методом обычной прогонки. Коэффициенты уравнения зависит от коэффициентов поглощения и плотности таких субстанции как водяной пар, водные капли, озон, углекислый газ.

Прямая солнечная радиация вычисляется из уравнения:

$$\frac{\partial S}{\partial z} - \beta S = 0, \tag{2.184}$$

где $\beta = \beta(\rho_S, \alpha', \cos\upsilon)$; ρ_s – плотность поглощающих субстанции; α' – коэффициент поглощения; υ – зенитный угол Солнца.

При наличии облачности, предполагалось, что солнечная радиация полностью поглощается в облачном слое. После определения u и S находится радиационный приток тепла на каждом уровне l:

$$\varepsilon_l = \alpha_l \left(u_l - 2B_l^* + \frac{\alpha_l'}{\alpha_l} S_l \right),$$

где $B^* = \sigma T^4$; σ – постоянная Стефана-Больцмана; α_l – суммарный коэффициент поглощения длинноволновой радиации.

Указанная модель расчета u была проверена на материале сравнительных наблюдений различных типов радиометрозондов, опубликованных ВМО [243]. Там же приведены расчеты длинноволнового излучения по более точной, спектральной модели [284]. В расчетах по схеме Марчука были сделаны следующие предположения:

1. Вертикальное распределение озона задано климатическим.
2. Плотность CO_2 рассчитывается по формуле:

$$\rho_c = \rho_c(0)\exp(-\beta_1 z); \quad \beta_1 = \frac{g}{RT}.$$

3. Распределение плотности водяного пара вычислялось следующим образом:

$$\rho_v = \frac{mp}{0{,}622\, R_W T},$$

где R_W – газовая постоянная для водяного пара; m – отношение смеси.

4. С помощью диаграммы определялись границы облачного слоя и плотность водных капель находилась из предположения, что вся влага в облачном слое конденсируется [251].

5. $S_0 = 1{,}98$ кал·см$^{-1}$мин$^{-1}$.

В модели «серой» атмосферы важное место занимает подбор оптимальных значений коэффициентов поглощения.

В результате большого числа экспериментов были подобраны средние коэффициенты поглощения для четырех поглощающих субстанции (пар, вода, озон, CO_2). Для α_c имеет место соотношение:

$$\alpha_c = \sum_{i=1}^{4} \rho_i \sigma_i^{(c)},$$

где ρ_i – плотность i-й поглощающей субстанции; $\rho_i\ \sigma_i^{(c)}$ – соответствующий ей массовый коэффициент поглощения.

Для $\sigma_i^{(c)}$ были выбраны следующие значения: водяной пар $\sigma_1^{(c)} = 6$ см$^2 \cdot$ г$^{-1}$; водные капли $\sigma_2^{(c)} = 500$ см$^2 \cdot$ г$^{-1}$; озон $\sigma_3^{(c)} = 2{,}5$ см$^2 \cdot$ г$^{-1}$; CO_2 $\sigma_4^{(c)} = 8$ см$^2 \cdot$ г$^{-1}$.

В наших расчетах облачные слои практически учитывались интегрально и конечно, не ставилась цель получить тонкие структуры потоков радиации в окрестностях облаков и они могут быть подкорректированы соответствующим подбором коэффициентов рассеяния α_s.

Таким образом, следует сделать вывод о принципиальной пригодности интегральной модели для описания радиационной структуры атмосферы. Учитывая ее относительную простоту, можно надеяться на эффективность использования такой модели численных схемах долгосрочных прогнозов погоды.

Таблица 31

Сравнение V в кал·см^2·мин$^{-1}$ для многоуровневой (А) и 5-уровневой (В) радиационной модели

H, км	А – для первого примера	В – для первого примера	А – для второго примера	В – для второго примера
22,0	0,290	0,283	0,309	0,309
11,0	0,312	0,307	0,410	0,412
5,9	0,514	0,518	0,506	0,502
2,5	0,726	0,734	0,677	0,695
0,58	0,800	0,800	0,790	0,794
0	0,798	0,800	0,800	0,794

Для того чтобы выяснить, насколько существенно скажется на результатах вертикальное разрешение, были проведены расчеты по многоуровневым и 5-уровневым данным модели атмосферы. Сравнение двух случаев (табл. 31) показало, что различия несущественны, и 5-уровневая модель достаточно хорошо описывает вертикальное распределение u .

2.4.9. Особенности расчета радиационных притоков тепла для облачных случаев

Присутствие облачных слоев вносит большие трудности в расчет радиационных характеристик. На данном этапе в нашей модели используется простой вариант, заключающейся в следующем.

Рассматривается три облачных слоя: 0–1 км, 1–4 км, 4–8 км. В каждом из них определяются балл облачности по формуле [164]:

$$c = ar + b,$$

где r – относительная влажность; a, b – эмпирические параметры, определяемые отдельно для каждого облачного слоя (см. например, работу В.П. Дымникова [69]). Кроме этого, потребуем для существования облачного слоя выполнения условий: $W > 2$ см·с$^{-1}$ и $r > 75\%$. В каждом обнаруженном облачном слое задается климатическая плотность облачных капель $(\rho_2)_{K\Lambda}$. В расчетах при этом используется не климатическая плотность $(\rho_2)_{K\Lambda}$, а вычисленная по формуле:

$$\rho_2 = c(\rho_2)_{K\Lambda}. \qquad (2.185)$$

После этого решается задача для определения u.

Для расчета прямой солнечной радиации представим (2.185) в конечных разностях:

$$S_{l-1} = \frac{2 - \beta_{l-1/2}\Delta z_{l-1/2}}{2 + \beta_{l-1/2}\Delta z_{l-1/2}} S_l, \tag{2.186}$$

где $\beta_l = \left(\sum_{i=1}^{4} \rho_i \sigma_i' \right)_l$; σ_i' – массовый коэффициент поглощения солнечной радиации i-й компонентой.

Если в интервале обнаружен облачный слой с баллностью C_l, то при этом, во-первых, ρ_2 вычисляется по (2.196), и, во-вторых, справа (2.186) надо умножить на множитель $(1 - C_l R_l)$, где R_l – альбедо облаков соответствующего слоя. Согласно [270б], примем: $R_5 = 0$, $R_4 = 0{,}19$, $R_3 = 0$, $R_2 = 0{,}5$. В общем, виде формула примет вид:

$$S_{l-1} = \frac{2 - \beta_{l-\frac{1}{2}}\Delta z_{l-1/2}}{2 + \beta_{l-\frac{1}{2}}\Delta z_{l-1/2}} \left(1 - C_l R_l\right) S_l, \tag{2.187}$$

где $S_6 = 1{,}98$ кал·см^{2}·мин$^{-1}$, а $(\rho_i)_6$ взяты климатическими.

3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

С целью математического моделирования представлены основные уравнения атмосферной циркуляции и распространения примесей в пограничном слое атмосферы для модельной оценки экологической обстановки. Полученная исходная система уравнений локальных атмосферных процессов линеаризована. Поставлены краевые и начальные условия для системы уравнений гидротермодинамики, особое внимание уделено условиям для скорости, температуры и влажности.

Выведены модели пограничного слоя атмосферы с незакрепленной верхней границей воздушной массы. Проведено замыкание системы уравнений гидротермодинамики относительно оператора турбулентного обмена.

Выявлены общая структура и основные входные данные для реализации модели переноса в атмосфере. Приведен решенный на основе комплекса моделей класс практических и исследовательских задач по изучению локальной циркуляции в ограниченной области. Определены требования к моделям, методике выходной информации, метеорологической информации и расчетов приземной концентрации отдельных ингредиентов от группы источников.

Проведен расчет полей рассеяния примесей по трехмерной модели с учетом классификации атмосферной устойчивости, метеорологических параметров и параметризации источников выбросов.

3.1. Исходные условия и постановка задачи математического моделирования

Среди задач охраны окружающей среды большое значение имеют исследования закономерностей распространения атмосферных примесей и особенностей их пространственно-временного распределения. Они являются основой для объективной оценки состояния и тенденции изменений загрязнения воздушного бассейна, а также разработки возможных мероприятий по обеспечению чистоты воздуха. В настоящее время для описания процессов переноса и диффузии примесей используется ряд математических моделей, основанных на решении уравнения турбулентной диффузии. При моделировании процессов распространения примесей важную роль играет выбор численных алгоритмов, обладающих свойствами консервативности и монотонности. Такими свойствами обладают численные алгоритмы, используемые нами в работах [1, 22].

Целью раздела является выбор оптимальных моделей для решения задач охраны окружающей среды, а также алгоритмов и программ, необходимых при применении этого комплекса для изучения условий формирования атмосферных циркуляций локальных областей под влиянием изменений термических и орографических характеристик поверхности [205–357]. Выбранная математическая

модель ориентирована на решение широкого класса задач, возникающих при оценке антропогенной нагрузки на окружающую среду посредством свойств поверхности земли и загрязнения воздушного бассейна.

Основным используемым методом исследования является метод математического моделирования метеорологических процессов и переноса примесей, с дальнейшей проверкой качества моделирования путем сопоставления с фактическими данными.

Пространственная модель локальных атмосферных процессов со свободной верхней границей, развивающихся над термически и орографически неоднородной подстилающей поверхностью, содержит следующие основные блоки:

– блок реализации трехмерной системы нестационарной нелинейной системы уравнений гидротермодинамики пограничного слоя атмосферы;

– блок тепло- и влагообмена в почве;

– блок трехмерной нестационарной модели переноса и диффузии примесей в пограничном и приземном слое атмосферы.

Модель локальных атмосферных процессов со свободной верхней границей была адаптирована для моделирования атмосферной циркуляций региона. По структуре – это комплекс математических моделей, привязка которых к условиям конкретного региона осуществляется на уровне входной информации.

Для исследования локальных атмосферных процессов происходящих в пограничном слое, используем математическую модель, основанную на системе уравнений гидротермодинамики. Вследствие сравнительно небольших горизонтальных масштабов (50×50 км) рассматриваемых мезометеорологических процессов, систему уравнений гидротермодинамики запишем в декартовой системе координат x, y, z. В качестве исходных взяты следующие уравнения: движения, неразрывности, состояния, притока тепла, удельной влажности, в которых участвуют искомые функции вектор скорости, температура, потенциальная температура, давление, плотность, удельная влажность, тензор вязких напряжений потока, тепла и влаги, являющиеся функциями координаты и время, полученные во втором разделе для реальных атмосферных процессов.

В конкретных видах потоки тепла и влаги, тензора вязких напряжений, состоянии среды участвуют универсальная газовая постоянная, скрытая теплота конденсации, удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении радиационная составляющая притока тепла, термический эквивалент работы, ускорение свободного падения, параметр Кориолиса, скорость образования жидкой фазы, определенная с точностью до турбулентных членов выраженная через сухоадиабатический и влажноадиабатический градиенты.

Для того чтобы получить согласованную систему для локальных атмосферных движений, метеорологические поля представили в виде суммы фонового значения поля и их отклонения от фоновых. Подставляя в исходные уравнения значения метеорологических полей в виде суммы фоновых – их отклонений, отбрасывая малые члены, которые появляются вследствие предположения, что отношение мало фоновых, а затем вычитая из получившихся уравнений соответствующие уравнения для фоновых полей, получим исходную систему уравнений локальных атмосферных процессов. Полаогая, чтобы фоновые поля с точностью

до малых слагаемых удовлетворяли исходные системы и пространственно-временные колебания плотности незначительными, получили окончательную систему уравнений в возмущениях, где участвуют параметры конвекции, а также вертикальный градиент стандартной атмосферы и горизонтальные градиенты фоновой потенциальной температуры и удельной влажности.

Одним из важных аспектов в решении задач пограничного слоя атмосферы является постановка математически корректных и физически непротиворечивых начальных и краевых условий для системы уравнений гидротермодинамики.

Постановка начальных и краевых условий во многом зависит от особенностей каждой конкретной обстановки. Поэтому рассмотрим некоторые общие замечания относительно условий при $t = 0$ в моделях рассматриваемого типа задаются по данным измерений и таким образом относятся к числу входных параметров. Однако на практике получение детальной физической информации о начальных мезомасштабных полях затруднительно. Поэтому для проведения численных расчетов для данного типа атмосферной циркуляции начальное поле возмущений считаем нулевым. В этом случае решение задачи при небольших значениях времени будет описывать адаптацию метеорологических полей к условиям, когда в процесс включается турбулентность.

Учитывая, что информация о полях метеоэлементов поступает от сети станций, расположенных вне регулярной области, поэтому требуется предварительно провести процедуру восстановления значения метеоэлементов в углах регулярной сети.

Алгоритм восстановления полей от данных измерений описаны согласно работы Марчук Г.И., Пененко В.В., Протасов А.В. [119, 145, 153]. В качестве краевых условий по горизонтали применяются равные нулю частные производные по соответствующим координатам от отклонения фоновых значений метеоэлементов на фиксированных точках.

Для того, чтобы эти условия не противоречили данным о рельефе и температуре почвы будем полагать, что функции о рельефе и температуре почвы были такими, чтобы в некоторых малых окрестностях границы среды исчезали неоднородности рельефа и температуры подстилающей поверхности. По вертикальной координате краевых условий предполагаем, что на доступно большой высоте происходит затухание возмущений метеорологических элементов, которые соответствуют предположению, что движение ограничено сверху неподвижной плоскостью. Более реально, что если на некоторой незакрепленной поверхности вертикальная скорость является функцией от незакрепленной границы. На поверхности рельефа горизонтальные составляющие скорости равны нулю, а вертикальная составляющая равна полной производной от функции рельефа по времени. Температура и влажность задаются как известные функции. В этом случае функция, определяющая верхнюю границу, является одной из искомых характеристик. Поэтому, использование такой модели требует преобразования системы уравнений гидротермодинамики, чтобы в ходе решения задачи, наряду с другими метеоэлементами определить функцию верхней границы и одновременно учитывать структуру рельефа подстилающей поверхности.

В настоящее время известны ряд способов определения высоты пограничного слоя атмосферы в зависимости от приземных турбулентных характеристик

и параметров фонового значения, основанных на формуле Дирдорфа, с величинами приземных потоков тепла и количества движения.

Слой вблизи поверхности земли (толщиной около 10–100 м) часто называют приземным слоем. Здесь, как правило, наблюдаются максимальные градиенты метеоэлементов. Важной особенностью приземного слоя в значительной мере оправдывающей выделение его в рамках планетарного пограничного слоя является относительное постоянство по высоте турбулентного потока. Хотя процесс в этом слое тесно связан с процессами во всем пограничном слое, часто для решения ряда важных практических задач достаточно установить внутренние связи между метеоэлементами и характеристиками турбулентности в одном только приземном слое. Основой для физического описания приземного слоя атмосферы является теория подобия для турбулентного режима в стратифицированной среде, указанной в работе Монина-Обухова [137].

В соответствии с этой теорией для приземного слоя атмосферы все статические характеристики пронормированные на масштабе характерной длины, скорости, температуры, являются универсальными функциями безразмерной высоты, которые обычно принимаются в качестве параметра гидростатической устойчивости. В этом случае, вертикальные предметы средних полей метеоэлементов с помощью некоторых функций, зависящих от безразмерных аргументов высоты. Знание конкретного вида этих функций позволяют определить турбулентные потоки тепла, влаги и движения. Используя теорию подобия Монина-Обухова [137] и эмпирические функции Бусинджера [224] запишем систему уравнений приземного слоя, куда входят скорость трения, масштаб потенциальной температуры и удельной влажности, высота приземного слоя, постоянная Кофмана, параметры поверхности для ветра и температуры, потока тепла, коэффициент трения и теплопередачи, температура и влажность подстилающей поверхности и некоторые непрерывные универсальные функции. В дальнейшем, формулы для высоты приземного слоя будут использованы краевыми условиями для задач локальных атмосферных процессов в области выше приземного слоя, пока предположение, что температура и влажность подстилающей поверхности известной функции координат и времени выполняется. Для прогностических задач это предположение довольно грубо, поэтому для реальных случаев наряду с другими метеоэлементами определяются температура и влажность подстилающей поверхности, включая в систему уравнений замыкающих уравнений температуры и влажности подстилающей поверхности.

Рассмотрим совместные модели динамики пограничного слоя атмосферы во взаимодействии с термически и орографически неоднородной подстилающей поверхности. Для суши это модель температурного режима почвы с уравнением баланса тепла на границе с атмосферой и модель влагообмена. Распределение температуры в почве описывается известным уравнением. В качестве условий на поверхности земли примем уравнение баланса тепла.

Как известно, что температура приземного воздуха и суммарного испарения увлажненной поверхности зависят от инсоляции деятельности поверхности. Различия в инсоляции склонов в зависимости от их экспозиций, могут привести в условиях орографической неоднократности подстилающей поверхности к значительным мезометеорологическим контрастам. Поэтому для расчета

потока солнечной радиации на поверхности склона используем ненормированную формулу из работы Будыка М.И. [49]. Во многих моделях динамики атмосферы для нахождения температуры почвы используются уравнения теплового баланса. Теплофизические характеристики почвы разнообразны, в результате чего даже на небольших расстояниях температуры над различными типами почвы резко различаются и тем самым влияют на динамику атмосферы в нижних слоях.

Кроме того, тепловой и влажностный режимы в системе почва – воздух из-за взаимной связи между собой воздействуют на формирование и развитие растений и тем самым влияют на окружающую среду. Изменения влажности почвы влечет за собой изменение баланса радиации на поверхности земли, из-за изменения альбедо подстилающей поверхности. С увеличением влажности альбедо уменьшается.

Решение системы уравнений гидродинамики при постоянном коэффициенте турбулентного обмена или турбулентной вязкости, показывает, что оно согласуется с некоторыми физически ясными свойствами интересующего нас течения, даже если толщину пограничного слоя рассматривать как заданный внешний параметр. Недостаток решения заключается в том, что из него следует пропорциональность сдвига ветра к сдвигу скорости геометрического ветра, при сколь угодно больших значениях коэффициента турбулентного обмена. Для замыкания системы уравнений пограничного слоя атмосферы относительно вертикальных коэффициентов диффузии применяем метод, основанный на решении уравнения баланса турбулентной энергии, операторы горизонтального турбулентного обмена рассчитывались через тензора вязких напряжений.

Необходимость использования различных подходов для описания вертикального и горизонтального турбулентного обмена связана с тем, что в уравнении баланса турбулентной энергии учитывается температурная стратификация атмосферы, что особенно важно для вертикального обмена. В природе при большой относительной влажности образуется облачность, в результате чего, в некоторых локальных областях, расположенных в верхних слоях атмосферы из-за выделения дополнительного притока тепла за счет конденсации изменяется стратификация атмосферы. Наблюдения над мезопроцессами, горизонтальные размеры которых несколько десятков километров, показывают, что они сопровождаются образованием облаков с горизонтальными размерами 5–10 км и вертикальными около 1,5–2,5 км. В связи с этим необходим учет фазовых переходов влаги.

В данном случае система уравнений пограничного слоя атмосферы с начальными и краевыми условиями решается с учетом члена образования жидкой фазы. И дополняется уравнением переноса и диффузии для удельной водности. Для численного моделирования гидрометеорологического режима промышленных районов необходимо иметь в качестве начальных данных значения метеоэлементов в узлах регулярной сетки. А измерения производятся на метеостанциях размещенных по территории крайне неравномерно. Поэтому возникает задача восстановления значений метеоэлементов на узлах сеточной области по их значениям на станциях. Вопрос о восстановлении структуры полей гидрометеоэлементов выполнен аналогично работы Пененко В.В. [145].

Известно, что степень загрязнения нижних слоев атмосферы вредными веществами зависит не только от технологических и конструктивных параметров

источников загрязнения, но и от ряда метеорологических факторов, которые определяют процесс распространения примесей в пограничном слое атмосферы. Этими факторами являются скорость ветра, термическая стратификация, орографикация местности, характер подстилающей поверхности и т.д. Поэтому для более полного описания процессов переноса диффузии и трансформации примесей, их необходимо рассматривать на базе физически достаточно богатой модели, учитывающей, по крайне мере, суточный ход изменчивости рассеяния в зависимости от метеорологических ситуаций, орографических и термических неоднородностей подстилающей поверхности. С этой целью, изложенную в начале модель динамики пограничного слоя атмосферы, дополним математической моделью переноса и трансформации примесей и далее они решаются совместно.

3.1.1. Исходная система уравнений локальных атмосферных процессов

Согласно изложенному выше из второго раздела данной работы возьмем следующие уравнения в виде:

– движения:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + lv + \frac{\partial \tau_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{12}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{13}}{\partial z}; \tag{3.1}$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} - lu + \frac{\partial \tau_{21}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{22}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{23}}{\partial z}; \tag{3.2}$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - g + \frac{\partial \tau_{31}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{32}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{33}}{\partial z}; \tag{3.3}$$

– неразрывности:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + div\rho\vec{u} = 0; \tag{3.4}$$

– состояния (Клайперона):

$$p = \rho RT; \tag{3.5}$$

– притока тепла:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{L_w}{c_p}\Phi + Q_r + \frac{\partial H_1}{\partial x} + \frac{\partial H_2}{\partial y} + \frac{\partial H_3}{\partial z}; \tag{3.6}$$

– удельной влажности:

$$\frac{dq}{dt} = -\Phi + \frac{\partial Q_1}{\partial x} + \frac{\partial Q_2}{\partial y} + \frac{\partial Q_3}{\partial z}; \tag{3.7}$$

$$\theta = T\left(\frac{1000}{p}\right)^{\frac{AR}{c_p}}, \tag{3.8}$$

где $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} + u\frac{\partial \varphi}{\partial x} + v\frac{\partial \varphi}{\partial y} + w\frac{\partial \varphi}{\partial z} \circ \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \vec{U}grad\varphi$; $\varphi = (u, v, w, \theta, q)$.

Скорость образования жидкой фазы Ф с точностью до турбулентных членов представим в виде [39, 104].

$$\Phi = i\frac{c_p}{L_w}(\gamma_a - \gamma_b)W; \tag{3.9}$$

$$i = \begin{cases} 1, & q \geq q_n; \\ 0, & q < q_n, \end{cases}$$

где γ_a – сухоадиабатический градиент; γ_a, γ_b – влажноадиабатический градиент, который определяется формулой:

$$\gamma_b(P,T) = \gamma_a \frac{p + 0{,}622\dfrac{L_w E}{RT}}{p + 0{,}622\dfrac{L_w^2 E}{c_p R_n T^2}}, \tag{3.10}$$

где t – время; u, v, w – компоненты вектора скорости ветра в направлений декартовых координат x, y, z соответственно; $\vec{U} = (u, v, w)$; T – температура; θ – потенциальная температура; p – давление; q – удельная влажность; ρ – плотность; R – универсальная газовая постоянная; L_w – скрытая теплота конденсации; c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; Q_r – радиационная составляющая притока тепла; A – термический эквивалент работы; g – ускорение свободного падения; l – параметр Кориолиса; τ_{ij}, $(i = \overline{1,3},\ j = \overline{1,3})$ – тензор вязких напряжений Рейнольдса; H_i, Q_i, $i = \overline{1,3}$ – потоки тепла и влаги в направлениях x, y, z соответственно. Вид слагаемых τ_{ij}, H_i, Q_i конкретизируем отдельно.

Решать задачи мезометеорологии непосредственно с помощью системы (3.1)–(3.8) нецелесообразно в связи с тем, что, во-первых, система кроме интересующих нас локальных атмосферных процессов описывает крупномасштабные процессы, звуковые волны. Во-вторых, не все члены имеют одинаковый порядок, а некоторые нелинейные члены могут быть без ущерба для физического смысла и точности линеаризованы.

В данном случае такими членами являются:

$$\overline{V}_t^t - l_o\overline{U}^{2t} - \frac{C_P T_0}{a\Delta\theta\overline{\pi}^{-\theta\lambda}}\overline{\overline{\pi}_\lambda^{\theta}}^{2t} = \overline{F^{(V)}}^{\theta\lambda};\ \ \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y};\ \ \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}.$$

Для линеаризации этих членов, введем функцию [37, 104], пропорциональную давлению:

$$\pi = \frac{c_p\theta_0}{A}\left(\frac{p}{1000}\right)^{\frac{AR}{c_p}} = \frac{c_p\Theta_0}{A\theta}T, \tag{3.11}$$

где Θ_0 – среднее значение потенциальной температуры.

Используя уравнения состояния, определение потенциальной температуры и функции, получим:

$$-\frac{1}{\rho}gradp = \frac{\theta}{\Theta_0}grad\pi. \tag{3.12}$$

Учитывая, что $\dfrac{\theta}{\Theta_0} = \left(\Theta_0 + \theta'\right)\Big/\Theta_0 \approx 1$, так как $\dfrac{\theta}{\Theta_0} << 1$, систему уравнений (3.1)–(3.3) приведем к виду:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial \pi}{\partial x} + lv + \frac{\partial \tau_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{12}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{13}}{\partial z}; \tag{3.13}$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\partial \pi}{\partial y} - lu + \frac{\partial \tau_{21}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{22}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{23}}{\partial z}; \tag{3.14}$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{\partial \pi}{\partial z} - g + \frac{\partial \tau_{31}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{32}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{33}}{\partial z}. \tag{3.15}$$

Для того чтобы получить согласованную систему для локальных атмосферных движений, представим метеорологические поля в виде

$$p = P + p'; \quad \pi = \Pi + \pi'; \quad \rho = R + \rho'; \quad T = T + T'; \quad \theta = \Theta + \theta'. \tag{3.16}$$

Здесь большими буквами обозначены фоновые поля, а штриховыми – отклонения.

Подставляя (3.16) в (3.6), (3.7) и (3.13)–(3.15) и отбрасывая малые величины, которые появляется в последствии предположения, что $T' << T$, $p' << P$, $\pi' << \Pi$, $\left|\theta - \Theta\right| << \Theta$, а затем, вычитывая из получившихся уравнений соответствующие уравнения для фоновых полей, получим искомую систему уравнений локальных атмосферных процессов. Для построения уравнений в возмущениях потребуем, чтобы фоновые поля с точностью до малых слагаемых удовлетворяли исходной системе (3.1)–(3.7), кроме того, предполагая временно-пространственные колебания ρ незначительными, получим окончательную систему уравнений:

$$\frac{\partial u'}{dt} + \vec{U}\, gradu = -\frac{\partial \pi'}{\partial x} + lv' + \frac{\partial \tau_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{12}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{13}}{\partial z}; \tag{3.17}$$

$$\frac{\partial v'}{\partial t} + \vec{U}\, gradv = -\frac{\partial \pi'}{\partial y} - lu' + \frac{\partial \tau_{21}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{22}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{23}}{\partial z}; \tag{3.18}$$

$$\frac{\partial w'}{\partial t} + \vec{U} gradw = -\frac{\partial \pi'}{\partial z} + \lambda\theta' + \frac{\partial \tau_{31}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{32}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{33}}{\partial z}; \tag{3.19}$$

$$\frac{\partial \theta'}{dt} + \vec{U}\, grad\theta' + Sw' = -u'\theta_x - v'\theta_y + \frac{L_w}{c_p}\Phi + Q_r + \frac{\partial H_1}{\partial x} + \frac{\partial H_2}{\partial y} + \frac{\partial H_3}{\partial z}; \tag{3.20}$$

$$\frac{\partial q'}{dt} + \vec{U}\, gradq' + W\frac{\partial Q}{\partial z} = -\Phi - u'Q_x - v'Q_y + \frac{\partial Q_1}{\partial x} + \frac{\partial Q_2}{\partial y} + \frac{\partial Q_3}{\partial z}; \tag{3.21}$$

$$\frac{du'}{dx} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0, \tag{3.22}$$

где $\lambda = g/T$; $S = \gamma_a - \gamma$ – параметры конвекции и температурной стратификации; γ – вертикальный градиент стандартной атмосферы; $\theta_x = \dfrac{\partial \theta}{\partial x}$; $\theta_y = \dfrac{\partial \theta}{\partial y}$; $Q_x = \dfrac{\partial Q}{\partial x}$;

$Q_y = \dfrac{\partial Q}{\partial y}$ – горизонтальные градиенты фоновой потенциальной температуры и удельной влажности.

Отметим, что систему (3.17)–(3.22) можно в некоторых случаях упростить следующим образом. Если горизонтальные процессы рассматриваемых процессов много больше вертикальных и нет интенсивных источников возмущений, способных привести к мощным вертикальным ускорениям, то в уравнении (3.19) можно пренебречь операторами переноса и турбулентного переноса, а также производной по времени. Тогда уравнение (3.19) примет вид:

$$\frac{\partial \pi'}{\partial z} = \lambda \theta'. \tag{3.23}$$

В дальнейшем, для численного расчета будем использовать уравнения гидротермодинамики в квазистатистическом приближении.

3.1.2. Постановка краевых и начальных условий для системы уравнений гидротермодинамики

Одним из важных аспектов решений задач пограничного слоя атмосферы является постановка математически корректных и физически непротиворечивых краевых и начальных условий для системы уравнений гидротермодинамики (3.17)–(3.23). Постановка краевых и начальных условий во многом зависит от особенностей каждой конкретной задачи. Поэтому рассмотрим лишь некоторые общие замечания относительно условий для скорости, температуры и влажности.

Начальные условия при $t = 0$ в моделях рассматриваемого типа задаются по данным измерений, и таким образом относятся к числу входных параметров. Однако на практике получение детальной физической информации о начальных мезомасштабных полях затруднено, поэтому, для проведения числовых расчетов можно положить:

$$u' = 0,\ v' = 0,\ \theta' = 0,\ q' = 0 \text{ при } t = 0. \tag{3.24}$$

В этом случае решение задачи при небольших значениях $t \in [0,\ T]$ будет описывать адаптацию метеорологических полей к условиям, когда в процесс включается турбулентность.

При решении конкретных практических задач в общем случае целесообразно задавать начальное условие при $t = 0$ в следующем виде:

$$u = u(\vec{x});\quad v = v(\vec{x});\quad \theta = \theta(\vec{x});\quad q = q(\vec{x});\quad \vec{x} = (x, y, z), \tag{3.24а}$$

где u, v, θ, q – определяются из результатов измерений в реальной атмосфере. Учитывая, что информация о полях метеоэлементов поступает от сети станций, расположенных в нерегулярной области, требуется предварительно провести процедуру восстановления значений метеоэлементов в узлах регулярной сети. Алгоритм восстановления полей по данным измерений описан в [34, 48, 57].

В качестве краевых условий по горизонтали примем:

$$\frac{\partial u'}{\partial x} = 0;\ \ \frac{\partial v'}{\partial x} = 0;\ \ \frac{\partial \theta'}{\partial x} = 0;\ \ \frac{\partial q'}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = \pm X; \tag{3.25}$$

$$\frac{\partial u'}{\partial y}=0;\quad \frac{\partial v'}{\partial y}=0;\quad \frac{\partial \theta'}{\partial y}=0;\quad \frac{\partial q'}{\partial y}=0\quad \text{при } y=\pm Y. \tag{3.26}$$

Для того, чтобы условия (3.25)–(3.26) не противоречили данным о рельефе $\delta(x, y)$ и температуре почвы $T_s(x, y)$, будем задавать функции δ и T_s, так, чтобы в некоторой малой ε окрестности границ $\pm X, \pm Y$ исчезали неоднородности рельефа и температуры подстилающей поверхности:

$$\left.\frac{\partial \delta}{\partial x}\right|_{X-\varepsilon}=\text{const};\quad \left.\frac{\partial \delta}{\partial x}\right|_{-X+\varepsilon}=\text{const};\quad \left.\frac{\partial \delta}{\partial y}\right|_{Y-\varepsilon}=\text{const};\quad \left.\frac{\partial \delta}{\partial y}\right|_{-Y+\varepsilon}=\text{const}; \tag{3.27}$$

$$\left.\frac{\partial T_s}{\partial x}\right|_{X-\varepsilon}=0;\quad \left.\frac{\partial T_s}{\partial x}\right|_{-X+\varepsilon}=0;\quad \left.\frac{\partial T_s}{\partial y}\right|_{Y-\varepsilon}=0;\quad \left.\frac{\partial T_s}{\partial y}\right|_{-Y+\varepsilon}=0.$$

Постановка условий для (3.25)–(3.27) вызвана отсутствием информации о реальных мезометрологических полях.

Наряду с условиями (3.25)–(3.26), будем рассматривать условия, определяющие выход процессов, происходящих внутри области на режим фонового потока. Эти условия могут быть записаны следующим образом:

$$u=U_\Phi;\ v=V_\Phi;\ \theta=\Theta_\Phi;\ q=Q_\Phi\quad \text{при } x=\pm X,\ y=\pm Y. \tag{3.28}$$

Теперь рассмотрим постановку краевых условий по вертикальной координате z. Естественно, можно предположить, что достаточно большой высоте происходит затухание возмущений метеорологических элементов, т.е.

$$u'=0;\ v'=0;\ \theta'=0;\ q'=0;\ w'=0 \text{ при } z=H=\text{const}, \tag{3.29}$$

которое соответствует предположению, что движение ограничено сверху неподвижной плоскостью.

В некоторых задачах пограничного слоя атмосферы вместо (3.29) используются более реальные условия:

$$\left.\begin{aligned} W&=\frac{\partial h}{\partial Z}+U\frac{\partial H}{\partial x}+v\frac{\partial H}{\partial y}\\ \pi&=\pi'+\Pi \end{aligned}\right\}\quad \text{при}\quad z=H(x,y,t). \tag{3.30}$$

Неизвестная функция $H(x, y, t)$ описывает незакрепленную поверхность верхней воздушной массы. Первое условие (3.30) является условием обтекания идеальной жидкостью криволинейной поверхности.

При $z=\delta(x, y)$ в качестве краевых условий примем:

$$u=0;\quad v=0;\quad w=\frac{d\delta}{dt};\quad \theta'=f(x, y, t);\quad q'=\tilde{Q}(x,y,t), \tag{3.30a}$$

где функции $f(x, y, t)$, $\tilde{Q}(x,y,t)$ пока считаются заданными величинами.

3.1.3. Модель пограничного слоя атмосферы с незакрепленной верхней границей воздушной массы

В атмосфере часто наблюдаются инверсионные ситуации, когда более теплая воздушная масса находится выше холодной. Эти воздушные массы отделяются свободной поверхностью $H(x, y, t)$, которая является искомой величиной. При этом можно предположить, что высота пограничного слоя атмосферы совпадает с нижней границей инверсии.

В отличие от постановки задачи пограничного слоя, где обычно верхняя граница имеет фиксированную высоту, в этом случае функция $H(x, y, t)$ является одной из искомых характеристик. Поэтому, использование такой модели требует преобразования системы уравнений гидротермодинамики (3.17)–(3.23) таким образом, чтобы в ходе решения задачи, наряду с другими метеоэлементами, определить функцию $H(x, y, t)$ и одновременно учитывать структуру рельефа подстилающей поверхности.

В настоящее время известен ряд способов определения высоты пограничного слоя атмосферы в зависимости от приземных турбулентных характеристик, и параметров фонового течения, основанных на формуле Дирдорфа [234], с величинами приземных потоков тепла и количества движения. Особенно важно описание физических процессов, происходящих вблизи верхней границы пограничного слоя. В данном случае высота $H(x, y, t)$ представляет собой уровень, где возмущения метеорологических элементов затухают. Значение функции $H(x, y, t)$ зависит от гидрометеорологических процессов всего пограничного слоя, и поэтому, чем богаче модель физически, тем более правильно можно охарактеризовать эту высоту.

Рассмотрим систему уравнений гидротермодинамики (3.1)–(3.23) при следующих начальных и краевых условиях:

$$u' = 0; \quad v' = 0; \quad \theta' = 0; \quad q' = 0; \quad H(x, y) = H^0(x, y) \text{ при } t = 0; \tag{3.31}$$

$$\frac{\partial u'}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial v'}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial \theta'}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial q'}{\partial x} = 0 \text{ при } x = \pm X; \tag{3.32}$$

$$\frac{\partial u'}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial v'}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \theta'}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial q'}{\partial y} = 0 \quad \text{при } y = \pm Y; \tag{3.33}$$

$$u' = 0; \quad v' = 0; \quad \theta' = \alpha \Delta T; \quad q' = 0; \quad \pi' = 0; \quad w' = \frac{dH}{dt} \text{ при } z = H(x, y, t); \tag{3.34}$$

$$u = 0; \quad v = 0; \quad \theta' = f(x, y, t); \quad w = \frac{d\delta(x, y)}{dt}; \quad q' = \tilde{Q}(x, y, t), \text{ при } z = \delta(x, y), \tag{3.35}$$

где $\Delta T = T_{\text{теп}} - T_{\text{хол}}$; $H^0(x, y)$ – начальная заданная высота слоя инверсии. Функции f, $\tilde{Q}$ предполагаются заданными.

В данном случае мы будем иметь задачу о пограничном слое атмосферы при движении воздушной массы над термически и орографически неоднородной поверхностью со свободной верхней границей воздушной массы, которая учитывается в краевых условиях (3.34).

Преобразуем (3.17)–(3.23) таким образом, чтобы получить уравнение для нахождения функции $H(x, y, t)$.

С этой целью перейдем от переменных t, x, y, z к новым независимым переменным $x' = x$; $y' = y$; $t' = t$ и определим вертикальную координату следующим образом [4, 52, 53, 106]:

$$\delta = \frac{z - \delta(x,y)}{\bar{h}(x,y,t)},$$

где
$$\bar{h}(x,y,t) = H(x,y,t) - \delta(x,y). \tag{3.36}$$

Функция $\delta(x, y)$ описывает рельеф подстилающей поверхности. Ордината z теперь зависимая переменная, определяемая, согласно (3.36), как

$$z(x,y\delta,t) = \delta\bar{h}(x,y,t) + \delta(x,y). \tag{3.37}$$

Переход от первоначальной системы координат t, x, y, z к новой t', x', y', δ осуществляется с помощью следующих преобразований:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial x} = \frac{\partial\varphi}{\partial x'} + \frac{\partial\varphi}{\partial\delta}\frac{\partial\delta}{\partial x'}; \quad \frac{\partial\varphi}{\partial y} = \frac{\partial\varphi}{\partial y'} + \frac{\partial\varphi}{\partial\delta}\frac{\partial\delta}{\partial y'}; \quad \frac{\partial\varphi}{\partial z} = \frac{\partial\varphi}{\partial\delta}\frac{\partial\delta}{\partial z}; \quad \varphi = (u, v, \theta, q, \pi). \tag{3.38}$$

В новых переменных символ индивидуальной производной будет иметь вид:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\partial\varphi}{\partial t} + U\frac{\partial\varphi}{\partial x'} + V\frac{\partial\varphi}{\partial y'} + \tilde{W}\frac{\partial\varphi}{\partial\delta}. \tag{3.39}$$

В (3.39) фигурирует неизвестная функция $\tilde{W}(x, y, \delta, t)$ (аналог вертикальной скорости), которая связана с W с соотношением:

$$W = \bar{h}\tilde{w} + \delta\left(\frac{\partial\bar{h}}{\partial t} + u'\frac{\partial\bar{h}}{\partial x} + v'\frac{\partial\bar{h}}{\partial y}\right) + \delta_x u' + \delta_y v'. \tag{3.40}$$

В новой системе координат уравнения гидротермодинамики (3.17)–(3.23), описывающие локальные атмосферные движения, примут следующий вид:

$$\frac{\partial u'}{dt} + \vec{U}grad_\delta u = -\frac{\partial\pi'}{\partial x} - \frac{\partial\pi'}{\partial\delta}a_1 + \\ +lv' + \frac{\partial\tau_{11}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{12}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial\delta}\left(a_1\tau_{11} + a_2\tau_{12} + a_3\tau_{13}\right); \tag{3.41}$$

$$\frac{\partial v'}{dt} + \vec{U}grad_\delta v = -\frac{\partial\pi'}{\partial y} - \frac{\partial\pi'}{\partial\delta}a_2 - \\ -lu' + \frac{\partial\tau_{21}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{22}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial\delta}\left(a_1\tau_{11} + a_2\tau_{12} + a_3\tau_{13}\right); \tag{3.42}$$

$$\frac{\partial\pi'}{\partial\delta} = \lambda\bar{h}\theta'; \tag{3.43}$$

$$\frac{\partial\theta'}{dt}+\vec{U}grad_{\delta}\theta'+S\overline{h}\tilde{w}+S\delta a_4+u'\left(\delta_x S+\theta_x\right)+v'\left(\delta_y S+\theta_y\right)= \\ =-\frac{L_w}{c_p}\Phi+Q_r+\frac{\partial H_1}{\partial x}+\frac{\partial H_2}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial\delta}\left(a_1\tau_{11}+a_2\tau_{12}+a_3\tau_{13}\right); \tag{3.44}$$

$$\frac{\partial q'}{dt}+\vec{U}grad_{\delta}q'+\gamma_q\overline{h}\tilde{w}+\gamma_q\delta a_4+u'\left(\gamma_q\delta_x+Q_x\right)+v'\left(\gamma_q\delta_y+Q_y\right)= \\ =-\Phi+\frac{\partial Q_1}{\partial x}+\frac{\partial Q_2}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial\delta}\left(a_1\tau_{11}+a_2\tau_{12}+a_3\tau_{13}\right); \tag{3.45}$$

$$\frac{\partial\overline{h}}{\partial t}+\frac{\partial\overline{h}u'}{\partial x}+\frac{\partial\overline{h}v'}{\partial y}+\frac{\partial\overline{h}\tilde{w}'}{\partial\delta}=0; \tag{3.46}$$

$$grad_{\delta}\varphi=u\frac{\partial\varphi}{\partial x}+v\frac{\partial\varphi}{\partial y}+\tilde{w}\frac{\partial\varphi}{\partial\delta},\ \varphi=(u,\ v,\ \theta',\ q'),$$

где θ_x, θ_y, Q_x, Q_y – горизонтальные градиенты фоновой потенциальной температуры и влажности.

$$a_1=\frac{\partial\delta}{\partial x};\quad a_2=\frac{\partial\delta}{\partial y};\quad a_3=\frac{\partial\delta}{\partial z};\quad a_4=\frac{\partial\delta}{\partial t}. \tag{3.47}$$

Начальные и краевые условия (3.31)–(3.35) преобразуются соответственно в следующие:

$$u'=0;\quad v'=0;\quad \theta'=0;\quad q'=0;\quad H(x,y)=H^0(x,y)\ \text{ при } t=0; \tag{3.48}$$

$$\frac{\partial u'}{\partial x}=0;\ \frac{\partial v'}{\partial x}=0;\ \frac{\partial\theta'}{\partial x}=0;\ \frac{\partial q'}{\partial x}=0 \text{ при } x=\pm X; \tag{3.49}$$

$$\frac{\partial u'}{\partial y}=0;\ \frac{\partial v'}{\partial y}=0;\ \frac{\partial\theta'}{\partial y}=0;\ \frac{\partial q'}{\partial y}=0\quad \text{при } y=\pm Y; \tag{3.50}$$

$$u'=0;\quad v'=0;\ \tilde{w}=0;\ \theta'=\alpha\Delta T;\ \ q'=0;\ \pi'=0;\quad \text{при } \delta=1; \tag{3.51}$$

$$u=0;\quad v=0;\quad \theta'=f(x,y,t);\quad q'=\overline{Q}\left(x,y,\ t\right);\ \tilde{w}=0\ \text{ при } \delta=0. \tag{3.52}$$

Условие (3.52) имеет место в том случае, когда система уравнений пограничного слоя атмосферы решается без учета квазиоднородного приземного слоя. С подключением уравнений приземного слоя вид краевых условий (3.52) несколько изменяется, что будет рассмотрено несколько позже.

Прежде чем перейти к решению задачи (3.31)–(3.32), целесообразно осуществить некоторое преобразование уравнений. Проинтегрируем уравнение неразрывности (3.46) по δ. Учитывая условия для $\tilde{W}$ при δ = 1, получим:

$$\tilde{W}\left(\delta\right)=\frac{1}{h}\left[\left(1-\delta\right)\frac{\partial\overline{h}}{\partial t}+\int_{\delta}^{1}\left(\frac{\partial\overline{h}u'}{\partial x}+\frac{\partial\overline{h}v'}{\partial y}\right)d\delta\right]. \tag{3.53}$$

При $\delta = 0$ из краевого условия (3.52) и уравнения (3.53) следует:

$$\frac{\partial \overline{h}}{\partial t} = -\int_{\delta}^{1}\left(\frac{\partial \overline{h}\overline{u}'}{\partial x} + \frac{\partial \overline{h}\overline{v}'}{\partial y}\right)d\delta. \tag{3.54}$$

В дальнейшем, наряду с уравнением (3.46), будем пользоваться уравнением неразрывности в форме (3.54). Подставляя (3.54) в (3.53), получим диагностическое уравнение для определения $\tilde{W}(\delta)$ – аналога для вертикальной скорости:

$$\tilde{W}(\delta) = \frac{1}{h}\left[\delta\int_{0}^{1}\left(\frac{\partial \overline{h}\overline{u}'}{\partial x} + \frac{\partial \overline{h}\overline{v}'}{\partial y}\right)d\delta - \int_{0}^{\delta}\left(\frac{\partial \overline{h}\overline{u}'}{\partial x} + \frac{\partial \overline{h}\overline{v}'}{\partial y}\right)d\delta\right]. \tag{3.55}$$

3.1.4. Замыкание системы уравнений гидротермодинамики относительно оператора турбулентного обмена

Система уравнений (3.17)–(3.23), описывающая динамику пограничного слоя атмосферы, является незамкнутой относительно величин $\tau_{i,j} = \overline{u_i u_j}$, представляющих собой тензор вязких напряжений Рейнольдса. В настоящее время уже хорошо известно, что роль этих напряжений в динамике осредненного течения очень велика и пренебречь ими никак нельзя.

При самых ранних попытках решить систему уравнений гидротермодинамики турбулентные напряжения $\tau_{i,j} = \overline{u_i u_j}$ представлялись по аналогии с вязкими напряжениями в ньютоновской жидкости, только коэффициент пропорциональности перед градиентом скорости задавался большим и назывался коэффициентом турбулентного обмена или турбулентной вязкости:

$$\tau_{i,j} = K_\alpha \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_j}; \quad \varphi_i = (u, v, w)_i. \tag{3.56}$$

В ранних работах, начиная с работы Экмана [22], уравнения решались с постоянными или как-либо априорно заданными коэффициентами турбулентного обмена. Решение системы уравнений гидродинамики при $K_\alpha = \text{const}$ показывает, что оно не согласуется с некоторыми физически ясными свойствами интересующего нас течения, даже если толщину пограничного слоя рассматривать как заданный внешний параметр. Недостаток решения заключается в том, что из него следует пропорциональность сдвига ветра сдвигу скорости геострафического ветра при сколь угодно больших значениях K_α.

Следующим этапом явились исследования Е.Н. Блиновой и И.А. Кибеля [36, 83], М.Н. Юдина [204], в которых предложено выражать некоторые характеристики профиля коэффициенты турбулентного обмена через характеристики профиля средней скорости.

Далее А.С. Монин [135, 136] предложил для замыкания использовать уравнения баланса турбулентной энергии, и вытекающие из гипотезы приближенного подобия Колмогорова некоторые соотношения [92].

Суть моделей, основанных на замыкании второго порядка состоит в том, что вторые моменты, а именно напряжения Рейнольдса и потоки скалярных

субстанции не апроксимируются посредством приближения турбулентной диффузии, а сохраняются как неизвестные параметры. Для замыкания задачи вводятся уравнения вторых моментов. Моменты из третьего порядка, которые появляются в уравнениях, апроксимируются на основании некоторых предположений подобия.

В данной работе, следуя [85, 87, 98, 112], симметричный тензор напряжения τ_{ij}, представим в виде функции, зависящей от тензора деформации D_{ij} среднего движения следующим образом:

$$\tau_{ij} = K_M D_{ij}, \ \ i,j = 1, 2, 3, \tag{3.57}$$

где

$$D_{i,j} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{i,j} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right). \tag{3.58}$$

Поток тепла определим по формуле:

$$H_j = K_H \frac{\partial \theta'}{\partial x_j}, \ \ j = 1, 2, 3, \tag{3.59}$$

где K_M, K_H – параметры кинематической вязкости и диффузии.

Для определения пространственно-временных изменений параметра K_M будем пользоваться формулировкой схемы замыкания:

$$K_M = \begin{cases} \left(\tilde{K}\tilde{\Delta} \right)^2 |Def|, & Ri > 1; \\ \left(\tilde{K}\tilde{\Delta} \right)^2 |Def| \left[1 - \left(K_H / K_M \right) \right] Ri, & Ri \le 1, \end{cases} \tag{3.60}$$

где K_H / K_M; $\tilde{\Delta} = \left(\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \right)^{1/3}$ – объем элементной расчетной ячейки сеточной области; $\tilde{K}$ – числовая константа. Деформацию Def определим по формуле:

$$Def^2 = \frac{1}{2}\left(D_{11}^2 + D_{22}^2 + D_{33}^2 \right) + D_{12}^2 + D_{13}^2 + D_{23}^2. \tag{3.61}$$

Число Ричардсона *Ri* представим в следующем виде [115]:

$$Ri = \frac{g}{\theta} \cdot \frac{\partial \Theta'}{\partial z} \Big/ Def^2 - \alpha_0, \tag{3.62}$$

где $\alpha_0 = \begin{cases} 0 & |\Theta'| \le 10^{-3}\theta; \\ \dfrac{\left(\left| \dfrac{\partial}{\partial x} \lambda \int\limits_H^z \Theta' dz \right| \left| \dfrac{\partial \Theta'}{\partial x} \right| + \left| \dfrac{\partial}{\partial y} \int\limits_H^z \Theta' dz \right| \left| \dfrac{\partial \Theta'}{\partial y} \right| \right)}{\left(|p_0 \Theta'| Def^2 \right)} & |\Theta'| > 10^{-3}\theta \end{cases}$

дополнительное слагаемое α_0 имеет стабилизирующий характер. Поскольку при наличии сильной орографической и термической неоднородности могут возникнуть большие температурные градиенты, введение параметра α_0 способствует погашению мелкомасштабных колебательных процессов.

В численных расчетах значения безразмерной константы $\tilde{K}$ брались из интервала 0,2–0,4 .

При проведении численных расчетов в квазистатистическом приближении применяется несколько упрощенное представление турбулентных слагаемых в виде:

$$\tau_{i,1} = \mu_x \frac{\partial \varphi_i}{\partial x}; \quad \tau_{i,2} = \mu_y \frac{\partial \varphi_i}{\partial y}; \quad \tau_{i,3} = \nu \frac{\partial \varphi_i}{\partial z}; \quad H_1 = \mu_x \frac{\partial \Theta'}{\partial x};$$

$$H_2 = \mu_y \frac{\partial \Theta'}{\partial y}; \quad H_3 = \nu_\Theta \frac{\partial \Theta'}{\partial z}; \tag{3.63}$$

$$Q_1 = \mu_x \frac{\partial q'}{\partial x}; \quad Q_2 = \mu_y \frac{\partial q'}{\partial y}; \quad Q_3 = \nu_q \frac{\partial q'}{\partial z}, \quad i = 1, 2, \varphi = (u, v),$$

где коэффициенты вертикального турбулентного обмена ν_u, ν_θ, ν_q определяются из уравнения баланса энергии турбулентности. Такое упрощение имеет смысл, поскольку в нижних слоях атмосферы одним из существенных факторов, влияющих на турбулентную структуру пограничного слоя атмосферы, являются вертикальные градиенты скорости ветра и температуры, которые на 1–2 порядка превосходят горизонтальные градиенты.

В дальнейшем, поскольку горизонтальные размеры рассматриваемой области намного больше, чем вертикальные, ограничимся рассмотрением двухмерного тензора, а вертикальный коэффициент турбулентного обмена ν_u определим из решения уравнения баланса турбулентной энергии.

3.1.5. Общая структура и основные входные данные для реализации модели переноса в атмосфере

Для реализации рассмотренных в работе методов и алгоритмов решения задачи пограничного и приземного слоя и переноса примесей создан комплекс программ, построенных на модульном принципе, что позволило упростить построение основных программ расчета, комплектуя их из отдельных программ-модулей. Программы написаны на алгоритмическом языке ФОРТРАН и реализованы на ЭВМ PC/AT.

Рассматриваемый комплекс программ включает в себя программы модули, реализующие следующие основные методы и алгоритмы:

– алгоритм решения системы уравнений гидротермодинамики в криволинейной системе координат;

– алгоритм решения уравнений для квазиоднородного приземного слоя;

– алгоритм расчета температуры и влажности на поверхности подстилающей поверхности;

– алгоритм решения уравнения турбулентного переноса примесей в атмосфере региона;

– алгоритм расчета вертикальных и горизонтальных коэффициентов турбулентного обмена;

– блок задания и идентификации входной информации;

– блок организации выдачи выходной информации в виде изолиний и таблиц, в этом блоке используется сервисные программы математического обеспечения графопостроителей и системы визуализации.

На основе комплекса моделей решен следующий класс практических и исследовательских задач по изучению локальной циркуляции в ограниченной области:

– исследование влияния антропогенных изменений свойств (термических, динамических, влажности и др.) подстилающей поверхности на динамику пограничного слоя атмосферы КНГМ;

– изучение закономерностей распространения загрязняющих примесей совместно с развитием гидротермодинамических процессов при различных погодных условиях (инверсии, штиле, внешнем потоке и др.) и с учетом изменений характеристик подстилающей поверхности региона;

– оценка и контроль загрязнения атмосферы и промышленных регионов;

– численное моделирование гидрометеорологического режима региона.

Комплекс программ построен таким образом, чтобы подключение определенного блока, необходимого при решении конкретной задачи, можно было осуществить через задание входных параметров модели.

Основные входные параметры, необходимые для моделирования микро климата локальной области:

– географические координаты и размеры рассматриваемой области;

– параметры дискретной области;

– время суток;

– зенитный угол и склонение Солнца;

– характеристики подстилающей поверхности (рельеф, параметры шероховатости, альбедо, теплофизические свойства почвы);

– значение фоновых полей метеоэлементов: компонент вектора скорости, температуры и влажности;

– распределение и мощности искусственных источников тепла, влаги и примесей.

Все величины, задаваемые во входной информации, являются функциями пространственных координат. Фоновые значения метеополей и примесей могут быть получены либо по данным наблюдений в атмосфере, либо из крупномасштабной модели динамики атмосферы. Шаги по времени и пространству задаются из конкретных требований поставленной задачи и возможностей используемой ЭВМ PC/AT.

В результате работы комплекса программ может быть получена следующая выходная информация:

– значения пространственных полей метеоэлементов и примесей в любой момент времени;

– поля интегральных концентраций примесей.

Выходная информация выдается в следующих формах:

– численные значения полей метеорологических элементов и концентрации примесей во всей области, ее частях или сечениях;

– изолинии полей метеоэлементов и концентраций примесей в различных сечениях;

– векторные поля скорости для различных сечений области.

3.1.6. Требования к моделям, методике выходной информации, метеорологической информации и расчетов приземной концентрации отдельных ингредиентов от группы источников

1. Модель трехмерная, гидродинамическая, нестационарная.

2. Модель описывает все процессы, определяющие выброс и перенос газоаэрозольной смеси нескольких примесей с учетом трансформации химических загрязняющих веществ: адвективный перенос; трехмерной турбулентной стратификации и шероховатости подстилающей поверхности; подъем вертикальными движениями (крупномасштабными, орографическими и мезомасштабными конвективными движениями); подъем выброса за счет начального импульса струи и ее перегрева окружающего воздуха; гравитационное осаждение примеси с подстилающей поверхности и ее вторичный перенос.

3. Математическая формулировка модели включает описание трехмерного уравнения сохранения массы и постановку начальных и граничных условий на земле, верхней и боковых границах, не препятствующих свободному вытеканию примеси за расчетную область.

4. Численная реализация модели использует численную схему обладающую: малой счетной вязкостью (2-й порядок аппроксимации по пространству и времени); имеет малую фазовую ошибку; консервативная и монотонная.

5. Программа будет реализована на персональной ЭВМ IBM PC/AT и иметь диалоговый режим задания основных начальных (входных) параметров.

6. Методика расчета рассматривает опасные метеорологические условия загрязнения их классификацию и позволит обобщать отдельные синоптические (опасные) ситуации на длительные периоды времени с целью прогноза возможного загрязнения окружающей среды. С учетом трансформации химических загрязняющих веществ.

Требования к выходной информации:

– плотность выпадения каждой примеси (H_2S, SO_2, NO_2) на подстилающую поверхность;

– концентрация каждой примеси приземная (0–10 м) и на высоте 100 м.

Если нужна дополнительная информация, то требуется указать.

Расчетная информация выдается в узлах расчетной сетки с шагом сетки, если требуется в пунктах указать их координаты.

Требования к заданию метеорологической информации:

– наименование и координаты ближайшей аэрологической станции зондирования;

– доступная информация по этой станции:

а) ежедневная (табл. 32);

б) среднемесячная (табл. 33);

в) давление (*P*), температура (*T*), точка росы (*Td*), направление (*ff*) и скорость ветра (*dd*), высота (*H*), изобарическая поверхность в м:

– названия и координаты приземных синоптических станций;

– доступная информация по каждой станции: ежедневная и среднемесячная.

Таблица 32

Требования к заданию ежедневной метеорологической информации

Число	Давление (мб)	Температура (ОС)	*Td* (ОС)	*ff* (град)	*dd* (м/с)	*H* (м)
01.01.2000	1003					
	925					
	850					
	700					
	500					

Таблица 33

Требования к заданию ежемесячной метеорологической информации

Число	Давление (мб)	Температура (ОС)	*Td* (ОС)	*Ff* (град)	*dd* (м/с)	Балл облачности	Осадки	Инверсии
Среднемесячное	1003							
	925							
	850							
	700							
	500							

Требования к заданию расчетной области:

– топографическая карта с нанесенным квадратом (областью расчета), указанием сторон света и нанесенными источниками;

– задание коэффициента шероховатости по всей области;

– задание шага сетки (необходимая детализация расчетов).

Требования к заданию источников (табл. 34):

– мощность источников в г/м^3 или задание концентрации в 2 г/м^3 каждой примеси (H_2S, SO_2, NO_2) в объеме выброса в м^3;

– одинакова ли концентрация при различных регламентах работы (отдувка и т.д.).

Таблица 34

Требования к заданию источников

Дата	Номер источника	Название пункта	Название	Объем выброса, мм3			Время
			режим работы	концентрация, г/м			начало и окончание
				HS	SO	NO	
01.01.2000	1	Карачаганак	отдувка, выжигание и т.д.	15	100	20	17,00–17,30 21,10–21,40

Отдувки и прочие режимы существуют в интервалах времени; указанных в документе (15–25 мин) или же это данные выборки:

– высота труб, из которых происходят выбросы.

– эффективная высота выброса или температура выброса, диаметр устья трубы.

3.2. Численная модель переноса и диффузии примесей с учетом классификации атмосферной устойчивости

Проведенный в пункте 1,2 настоящей главы анализ основных методов моделирования процессов распространения загрязнения в воздушной среде показывает необходимость использования для этих целей широкого класса численных моделей. А в большинстве случаев эти модели основаны на использовании уравнения атмосферной турбулентной диффузии [7], учитывающего основные метеорологические особенности моделируемых ситуаций.

Обычно считается, что поле ветра пространственно однородно и турбулентность равномерная по области. В этих случаях используются эмпирические модели гауссовского типа [6], удовлетворительно описывающие процесс рассеяния. Однако возможности таких моделей, при описании распространения примесей в турбулентном пограничном слое с пространственными размерами порядка 100 км, ограничены. Это связано со сложным характером метеорологических процессов на ограниченной территории, зависящих от орографических неоднородностей, от изменчивости турбулентных характеристик атмосферы, неодинаковой толщины слоя перемешивания и т.д.

В таких случаях не могут не учитываться пространственная неоднородность изменения поля скорости и характеристик турбулентности атмосферы. В настоящее время наибольший успех в моделировании процессов транспорта и переноса примесей в сложных метеорологических и орографических условиях получен на базе использования трехмерных сеточных моделей [311, 312]. В данном разделе приводится описание одной из таких моделей, дана ее численная реализация и проиллюстрирована область возможных практических применений.

3.2.1. Математическая модель

Атмосферные примеси представляет собой многокомпонентную среду, и различные компоненты взаимодействуют с атмосферой и между собой. В результате химических реакций могут возникать новые субстанции, не содержащиеся в первоначально выбрасываемых источниками веществах.

Используя уравнение сохранения массы для примесей в воздушной среде, которое описывает перенос, турбулентную диффузию, химическое взаимодействие, осаждение и выброс загрязнителей, получим осредненное по ансамблю уравнение концентраций:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -U\frac{\partial C_i}{\partial x} + V\frac{\partial C_i}{\partial y} + W\frac{\partial C_i}{\partial z} + \\ + \frac{\partial}{\partial x}\left(k_H \frac{\partial C_i}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_H \frac{\partial C_i}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_H \frac{\partial C_i}{\partial z}\right) + R_i + Q_i, \quad (i = 1, m), \qquad (3.64)$$

где m – общее число ингредиентов загрязнении; C_i – концентрация i-й примеси; U, V и W – компоненты вектора скорости; t – время; R_i – скорость производства

i-й примеси за счет химических реакций; Q_i – известная функция, описывающая источники и мощности выбросов *i*-й примеси.

Функция R_i – определяется с использованием соответствующих соотношений химической кинетики вида:

$$R_i = -\left(\sum_j d_i^j \prod_{k \neq i} C_k \right) C_i + \sum_l \left(P_i^l \prod_m C_m \right), \tag{3.65}$$

где d_i^j – коэффициент поглощения *i*-й примеси для реакции *j*; P_i^l – скорость производства *i*-й примеси для реакции *l*; C_k, C_m – ингредиенты примесей, участвующих соответственно в реакциях *j* и *l*.

Формально уравнение (3.64) параболического типа, но во многих метеорологических ситуациях перенос примесей в горизонтальной плоскости доминирует по отношению к диффузии и это приводит к существенной гиперболичности системы (3.64), что значительно осложняет построение адекватных численных алгоритмов для (3.64). Значительные трудности также возникают и при численном решении уравнений химической кинетики типа (3.65), поскольку в химических реакциях могут участвовать примеси со временем жизни от 10^{-7} с и до 10^5 с, а это обусловливает «жесткость» системы обыкновенных дифференциальных уравнений с правой частью вида (3.65) [38].

Граничные условия для задачи (3.64) составляются в следующем виде. На верхней границе пограничного слоя атмосферы высотой H – условия отсутствия примеси снизу, т.е. $\left\{ k_z \dfrac{\partial C_i}{\partial z} \right\}_{z=H}$. На нижней границе пограничного слоя условие определяется взаимодействием осаждаемой примеси с подстилающей поверхностью и задается в виде $\left\{ k_z \dfrac{\partial C_i}{\partial z} = V_g^i C_i \right\}_{z=0}$, где V_g^i – скорость осаждения *i*-й примеси, определяемая с использованием специальных методик [22]. На боковых границах при $x = X_w$ или $x = X_E$ и при $y = Y_S$ или $y = Y_N$, X_E X_w, Y_S, Y_N – западная, восточная, южная и северная границы моделируемой области, соответственно, граничные условия определяются в зависимости от направления входного потока в область. На границе типа «вток» ставится условие $-UC - k_H \dfrac{\partial C_i}{\partial x} = UC_i^0$, на «выток» – $-k_H \dfrac{\partial C_i}{\partial x} = 0$, где для определенности рассматривается $x = X_w$ либо $x = X_E$, а δ_i^0 – известная функция, описывающая изменение концентрации *i*-й примеси на входной границе. Начальные условия при $t = 0$ обычно полагаются равными нулю, поскольку крайне затруднительно определить начальные концентрации во всех точках сеточной области из-за разреженности и нерегулярности системы наблюдений за состоянием воздушной среды.

Метеорологические процессы, как известно, являются процессами с «короткой памятью» и выбор начального состояния через несколько часов после начала расчетов перестает влиять на дальнейший ход этих процессов. Поэтому такой способ определения начальных условий для исследования суточного хода изменений концентраций примесей является вполне приемлемым.

3.2.2. Метеорологические параметры

Интегрирование системы уравнений (3.64) с описанными выше граничными условиями требует задания поля скорости ветра, диффузионных коэффициентов k_H и k_Z, высоты пограничного слоя и констант, определяющих скорость химических реакций. Все эти величины определяются в зависимости от исходных метеорологических данных с использованием соответствующих методов, эмпирических либо математических моделей. Ниже обсуждаются типичные подходы и приемы по определению указанных входных метеорологических параметров.

Одним из существенных метеорологических элементов, определяющих качество моделирования процессов загрязнения на атмосфере является скорость ветра. При наличии достаточно подробной сети наблюдений за направлением и скоростью ветра на разных высотах и в стандартные метеорологические сроки для определения поля скорости в сеточной области обычно используются различные схемы объективного анализа [38], позволяющие оптимально интерполировать измеренные значения на всю область с сохранением известных физических соотношений. Однако, такие системы наблюдения имеются в настоящее время лишь в эпизодических случаях, поэтому требуется разработка соответствующих численных метеорологических моделей, описывающих динамику течения воздушных масс в типичных метеоусловиях рассматриваемого промышленного района. Интенсивность турбулентной диффузии, как известно, зависит от атмосферной устойчивости. При классификации устойчивости во многих случаях используется стандартная методика Раскуилло-Гиффорда [38] , которая определяет один из шести классов устойчивости в зависимости от скорости ветра, солнечной инсоляции и облачности. Полученные в настоящее время представления и оценки свидетельствуют, что эта методика достаточно субъективна и более менее оправдана при нейтральных метеорологических условиях. Поэтому, при определении диффузионных коэффициентов нами используется другой подход, получивший в последнее время наибольшее распространение, основанный на параметрах устойчивости в приземном слое атмосферы – масштабе длины Обухова-Монина (L) и динамической скорости (U) . Непосредственное измерение этих параметров требует измерения потока тепла измерения не всегда возможны. Параметры L и U можно определить используя значения числа Ричардсона и выражения для профиля скорости и температуры в приземном слое.

В конвективном пограничном слое рост интенсивности турбулентности зависит еще от двух параметров – толщины слоя перемешивания Z_i и масштаба скорости конвекции w_*, определяемого по формуле:

$$w_* = U_* \left(-\frac{1}{kL} Z_i \right)^{1/3}, \qquad (3.66)$$

где $k = 0{,}35$.

Окончательное выражение для вертикального коэффициента турбулентного обмена, согласно [38], приводится в табл. 33.

Определение коэффициента горизонтального турбулентного обмена в настоящее время сопряжено со значительными трудностями. Эти вопросы детально

обсуждаются в ряде работ, например в [38]. Однако, как мы это уже отмечали, во многих метеорологических ситуациях транспорт примесей за счет диффузии значительно меньше, чем путем адвекции. В этих случаях доминирующую роль начинает играть «искусственная» вязкость, возникающая в результате дискретной аппроксимации гиперболичных членов в уравнениях (3.64) и распределение концентраций примесей оказывается нечувствительным к выбору конкурентных значений k_H.

Таблица 35

Вертикальный турбулентный обмен

Устойчивость	$k_Z = \dfrac{KU_* Z}{0{,}74 + \dfrac{4{,}77}{L}}$
Нейтральные условия	$k_Z = KU_* Z l^{\frac{-4Z}{H}}$
Неустойчивость	$k_Z = \begin{cases} w_* Z_i \left[2{,}5 \left(\dfrac{KZ}{Z_i} \right)^{\frac{4}{3}} \left(1 - \dfrac{15Z}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \right], & 0 \le \dfrac{Z}{Z_i} \le 0{,}5; \\ w_* Z_i \left[2 \exp\left(6 - \dfrac{10Z}{L} \right) \right], & 0{,}05 \le Z \le 1{,}1; \\ w_* Z_i 0{,}0001, & \dfrac{Z}{Z_i} \ge 1{,}1 \end{cases}$

3.2.3. Численный метод

Рассмотрим теперь численную модель переноса и диффузии примеси в пограничном слое атмосферы с характерным горизонтальном масштабом порядка 100–200 км на фоне локальных атмосферных процессов. Все необходимые значения метеорологических полей и турбулентные характеристики определим из модели гидротермодинамики, описанной в разделах 2, 3 п. 1,2.

Для численного интегрирования метод расщепления, позволяющий систему четырехмерных уравнений в частных производных расщепить на три системы двумерных уравнений в переменных (x, t), (y, t), и (z, t). Каждая из этих систем интегрируется последовательно на каждом временном шаге, и полученное в конце цикла решение аппроксимирует исходную систему уравнений (3.64). Таким образом, дело сводится к интегрированию следующей системы:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + U \frac{\partial C_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_H \frac{\partial C_i}{\partial x} \right); \tag{3.67}$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + V \frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k_H \frac{\partial C_i}{\partial y} \right); \tag{3.68}$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + W \frac{\partial C_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_Z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + R_i + Q_i. \tag{3.69}$$

Если ввести обозначение T_x, T_y и T_z для численных аппроксимаций операторов транспорта примесей в направлениях X, Y, и Z соответственно, T_c для оператора химической трансформации, и для источников выбросов, то полное решение может быть получено в виде:

$$C^{n+1} = T_x T_y T_z T_c T_S(\alpha\Delta t) T_z T_x T_y [C^{n-1}], \tag{3.70}$$

где Δt – шаг по времени; n – текущий номер временного слоя.

Операторы T_x, T_y, и T_z в свою очередь также расщепляются на адвективные и диффузионные компоненты, т.е. $T_x = (T_x)_a (T_x)_d$, $T_y = (T_y)_a (T_y)_d$, $T_z = (T_z)_a (T_z)_d$.

Рассмотрим отдельно каждый этап решения для трех основных базовых операторных уравнений, соответствующих адвекции, диффузии и химической трансформации, с помощью которых согласно (3.70) определяется результирующее решение в момент времени $n \cdot \Delta t$.

а) Решение адвективного уравнения основано на использование явной разностной схемы со вторым порядком аппроксимации, обладающей свойством консервативности для массы. Эта схема имеет вид:

$$(T_x) = [C_{ikl}] = \frac{\left[F_{i-\frac{1}{2},k,l} - F_{i+\frac{1}{2},k,l}\right]}{\Delta t}, \tag{3.71}$$

где

$$F_{i-\frac{1}{2},k,l} = \frac{\Delta t \left[\dfrac{U_{i-\frac{1}{2},k,l}\left(C_{i-1,k,l} + C_{i,k,l}\right)}{2}\right]}{\dfrac{1}{2}\left(\Delta x_i + \Delta x_{i-1}\right)} - \frac{\dfrac{1}{2}\Delta t^2 \left[\dfrac{U_{i-\frac{1}{2},k,l}\left(C_{i,k,l} + C_{i-1,k,l}\right)}{\Delta x_{i-1}}\right]}{\dfrac{1}{2}\left(\Delta x_i + \Delta x_{i-1}\right)}; \tag{3.72}$$

$$F_{i+\frac{1}{2},k,l} = \frac{\Delta t \left[\dfrac{U_{i+\frac{1}{2},k,l}\left(C_{i+1,k,l} + C_{i,k,l}\right)}{2}\right]}{\dfrac{1}{2}\left(\Delta x_i + \Delta x_{i-1}\right)} + \frac{\dfrac{1}{2}\Delta t^2 \left[\dfrac{U_{i+\frac{1}{2},k,l}\left(C_{i,k,l} + C_{i+1,k,l}\right)}{\Delta x_i}\right]}{\dfrac{1}{2}\left(\Delta x_i + \Delta x_{i-1}\right)}. \tag{3.73}$$

Для предотвращения значительных технических ошибок и размывания «пиков» концентраций, а также сохранения положительных значений переменных C_{ikl} используется коррекция потоков [33]:

$$F_{i-\frac{1}{2},k,l} = \begin{cases} C_{i,k,l}, & if \quad U_{i-\frac{1}{2},k,l} \le 0, \quad C_{i,k,l} < F_{i-\frac{1}{2},k,l}; \\ C_{i-1,k,l}, & if \quad U_{i-\frac{1}{2},k,l} > 0, \quad C_{i-1,k,l} < F_{i-\frac{1}{2},k,l}; \end{cases} \tag{3.74}$$

$$F_{i+\frac{1}{2},k,l} = \begin{cases} C_{i,k,l}, & if \quad U_{i+\frac{1}{2},k,l} \ge 0, \quad C_{i,k,l} < F_{i+\frac{1}{2},k,l}; \\ C_{i+1,k,l}, & if \quad U_{i+\frac{1}{2},k,l} < 0, \quad C_{i+1,k,l} < F_{i+\frac{1}{2},k,l}. \end{cases} \tag{3.75}$$

Аналогичные соотношения могут быть получены и для компонент *y*, *Z*:

б) разностные схемы для решения диффузионного уравнения строятся в зависимости от координатных направлений. Горизонтальной плоскости доминирует адвекция, поэтому можно использовать обычную трехточечную явную схему:

$$(T_x)=\left[k_{H\,i+\frac{1}{2}}\left(C_{i+1,k,l}+C_{i,k,l}\right)\Delta x_i-k_{H\,i-\frac{1}{2}}\right]\left(C_{i,k,l}+C_{i-1,k,l}\right)\Delta x_i, \tag{3.76}$$

Для направления *Z*, с целью уменьшения ограничения на выбор используется неявная схема Кранка-Никольсона [33].

в) этап химической трансформации сводится к решению на интервале аΔt в каждой сеточной точке моделируемой области системы обыкновенных дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t}=R_i,\quad i=\overline{1,m}, \tag{3.77}$$

где R_i определяется в зависимости вида (3.65).

В силу отмеченной жесткости системы (3.77), для решения следует использовать полунеявные методы [38]. Один из простейших методов такого класса реализуется следующим образом. Пусть концентрации всех примесей (исключая *i*) известны (либо из предыдущего шага, или уже вычислены на текущем шаге). Тогда решение (3.77) можно аппроксимировать формулой:

$$C_i\big|_{i+\Delta t'}=\left.\frac{P_i}{D_i}\right|_t+\left.\left(C_i-\frac{P_i}{D_i}\right)\right|_t e^{-D_i\Delta t'}, \tag{3.78}$$

исходя из соотношения:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t}=-D_iC_i+P_i, \tag{3.79}$$

где $D_i=\sum_j d_i^j\prod_{k\neq 1}C_k;\quad P_i=\sum_l P_i^l\prod C_m,\quad i=\overline{1,m}.$

Предлагаемый алгоритм численного интегрирования основан на подразделении участвующих в химических реакциях примесей на две группы. Первую группу (возможно, пустую) составляют короткоживущие примеси типа OH, H_2O_2. Другую группу составляют оставшиеся долгоживущие примеси (SO_2, CO_2 и т.д.). Для определения концентраций примесей группы используется система алгебраических уравнений, полученная из псевдо-стационарной аппроксимации соответствующих правых частей в (3.79):

$$C_i=\frac{P_i}{D_1}=\frac{\sum_l P_i^l\prod_{m\in I_1}\overline{C_m}\prod_{n\in I_2}C_n,}{\sum_j d_i^j\prod_{k\neq i}\overline{C_k}\prod_{n\in I_2}C_n}, \tag{3.80}$$

где I_1, I_2 – множество индексов соответствующих короткоживущим и долгоживущим примесям, надчерком обозначены установившиеся значения концентраций примесей первой группы. Концентрации примесей, относящихся к числу долгоживущих, вычисляется далее и использованием формулы (3.78).

Точность интегрирования зависит от $\Delta t'$ и от констант химических реакций в (3.79). Для медленно реагирующих в воздушной среде примесей можно использовать достаточно большой шаг по времени, но он будет значительно меньше, если среди примесей будут быстро реагирующие (обычно $\Delta t' = 0{,}1{-}5$ мин, а $\Delta t = 5{-}10$ мин).

3.2.4. Параметризация источников выбросов

Одна из основных трудностей, возникающих при использовании численных сеточных моделей, состоит в переходе от описания характеристик источников примесей, имеющих локальный подсеточный масштаб, к их сеточному представлению. В случае, когда размеры начального факела выбросов сравнимы с размерами сеточной ячейки, соответствующее сеточное описание источников этих выбросов не вызывает затруднений и является достаточно точным. Поэтому для параметризации точечных источников выбросов можно использовать следующую процедуру. Вычислим, исходя из размеров сетки Δx , Δy, Δz и скорости диффузии, величину временного интервала T в течение которого ширина расплывающегося факела становится сравнима с сеточным масштабом:

$$T = \min\left\{\frac{\Delta x^2}{kH}, \frac{\Delta y^2}{kH}, \frac{\Delta z^2}{kH}\right\}. \tag{3.81}$$

Теперь, используя информацию о векторе скорости $\vec{v}$, определим новое положение центра этого факела по формуле:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{V}T, \tag{3.82}$$

где $\vec{v}$ – начальное положение источника и соответствующие узлы сетки, которые можно в численной модели принимать за источники выбросов примесей.

Геометрическая высота источника H_s обычно всегда ниже действительной высоты выброса, которую принято называть эффективной высотой из-за разности температур в устье труб и в окружающем воздухе. Определение дополнительной высоты подъема факела над трубой ΔH является достаточно сложной задачей.

Наиболее распространенным здесь является подход, предложенный Берляндом М.Е. и Бриггсом [6,7], где ΔH определяется по формулам:

$$\Delta H = 24\left(\frac{F}{U^3}\right)^{\frac{3}{5}}\left(H_s + 200\frac{F}{U^3}\right)^{\frac{2}{5}} \tag{3.83}$$

для конвективных и нейтральных условий и:

$$\Delta H = 2{,}6\left(\frac{F}{US}\right)^{\frac{1}{3}}. \tag{3.84}$$

для устойчивых условий. Здесь F – тепловой поток дымового выброса; U – средняя скорость ветра; $S = \left(\frac{g}{T_A}\right)j$; j – градиент потенциальной температуры; T_A – температура окружающей среды.

3.2.5. Иллюстративный пример

Рассмотрим результаты расчетов, полученных с помощью разработанной численной модели распространения примеси для следующей модельной ситуации. Пусть в области размером $X = Y = 70$ км, $H = 1700$ м имеется источник пассивной примеси на высоте $H_s = 250$ м при $X = Y = 0$, $\Delta x = \Delta y = 4$ км, $\Delta z = 50$ м при $z \le 200$ м, $\Delta z = 200$ м при $z > 200$ м, $k_H = 200$ м^2/с, $U = 5$ м/с, $v = w = 0$. Интегрирование по времени проводилось на интервале, равном 24 ч. На рис. 10 приведены результаты расчета проинтегрированной поперек ветра средней концентрации C^y, нормированной на величину Q/HU, где Q – мощность выброса источника. Распределение примеси соответствует установившемуся состоянию. Из анализа рисунка видно, что вблизи источника ось факела (т.е. линия максимальных концентрации) опускается вниз и достигает подстилающей поверхности. Это явление подтверждается данным многочисленных наблюдений.

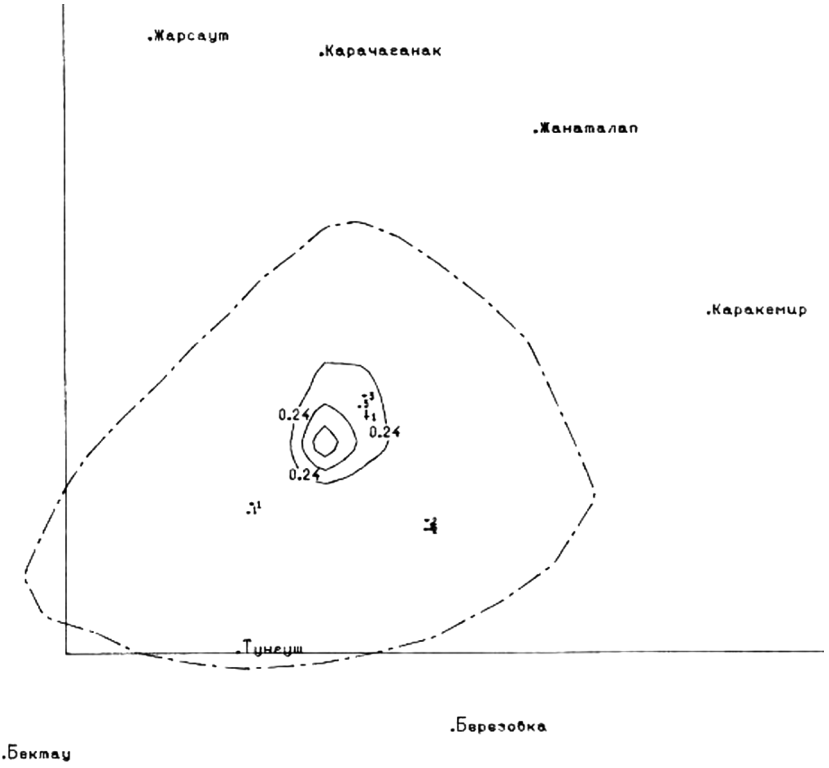


Рис. 10. Изолинии концентрации SO_2 в долях ПДК на высоте 50 м при конвективных условиях. Скорость поперечного ветра 3 м/с

С целью экономичности расчетов нами были использованы некоторые упрощения, связанные с определением необходимых для моделирования рассеяния вредных примесей метеоэлементов.

В частности, классификация атмосферной устойчивости от которой зависит интенсивность турбулентной диффузии, приводится с использованием стандартной методики Раксвилла-Гиффорда.

По этой методике в зависимости от скорости ветра, времени суток, солнечной инсоляции и градиента температуры в пограничном слое атмосферы (ПСА) определяются шесть классов устойчивости (*A*, *B*, *C*, *D*, *F*), начиная от *A* (наибольшая неустойчивость) и вплоть до *F* (наибольшая устойчивость).

Скорость ветра, как уже отмечалось, имеет горизонтальную однородность и задавалось с использованием простейшей Экмановской модели пограничного слоя. Интенсивность турбулентной диффузии по высоте ПСА задавалось с использованием параметра устойчивости в приземном слое атмосферы *L* и динамической скорости как и в [22]. Определение *L* и *u* проводилось согласно подходу, где конкретные значения этих параметров выбрались (для каждого класса устойчивости) в зависимости от известной скорости ветра вблизи земной поверхности и параметра шероховатости подстилающей поверхности z_0.

Сила ветра в ПСА определялась по степенному закону:

$$|u| = u_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^p ,$$

где p – показатель степени, зависящий от z_0 и класса устойчивости; u_r – известное значение приземного ветра на высоте z_r.

Угол поворота вектора скорости в ПСА (по модели Экмана) задается выражением:

$$\alpha = \frac{\sin\left(z_q\right)}{\left(\exp\left(z_q\right) - x\cos\left(z_q\right)\right)},$$

где $z_q = z\sqrt{\dfrac{kf}{20k_1}}$; k – параметр Кармана 45; f – параметр Кориолисса; k_1 – коэффициент вертикального обмена на высоте $|L|$.

Кроме того, в модели также были использованы следующие внешние по отношению к ПСА метеопараметры: h – высота приземного слоя атмосферы; z_n – высота ПСА; α_g – направление геострафического ветра в выбранной системе координат. Используемые при расчетах значения этих метеопараметров и параметры шероховатости представлены в табл. 36.

Таблица 36

Значение внешних параметров

Тип метеоситуации	H	z_0	z_n	α_g	z_r	u_r
Конвективные условия	10	0,1	600	10∘	8	3
Устойчивые условия	50	0,1	1500	−30∘	8	2

4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

При моделировании атмосферной циркуляции и распространении примесей в приземном слое атмосферы получены системы уравнений квазиоднородного приземного слоя, потока тепла и влаги в почву, а также проведено замыкание системы уравнений гидротермодинамики относительно оператора турбулентного обмена. Выведены уравнения блочной модели переноса вредных примесей в приземном слое атмосферы и описаны взаимодействия между блоками, а также разработаны численные схемы блочной модели переноса вредных примесей в бароклинной атмосфере. Проведены численные расчеты переноса вредных веществ в приземном слое атмосферы с учетом влияния подстилающей поверхности.

4.1. Модели атмосферной циркуляции и распространения примесей в приземном слое атмосферы

4.1.1. Системы уравнений квазиоднородного приземного слоя

Слой вблизи поверхности земли (толщиной около 10–100 м) называется приземным слоем. Здесь, как правило, наблюдаются максимальные градиенты метеорологических элементов. Важной особенностью приземного слоя, в значительной мере оправдывающей выделение его в рамках планетарного пограничного слоя, является относительное постоянство по высоте турбулентных потоков. Хотя процессы в этом слое тесно связаны с процессами во всем пограничном слое, часто для решения ряда практических, важных задач достаточно установить внутренние связи между метеорологическими элементами и характеристиками турбулентности в одном только приземном слое [358–402].

Основой для физического описания приземного слоя атмосферы является теория подобия для турбулентного режима в стратифицированной среде [137]. В соответствии с этой теорией для приземного слоя атмосферы все статистические характеристики, пронормированные на масштабы длины $L = \frac{u_*^2}{\lambda \chi^2 \theta_*}$, скорости $u_*^2 = \frac{\tau}{\rho}$ и температуры $T_* = \frac{H_1}{u_*}$, являются универсальными функциями безразмерной высоты $\varsigma = \frac{z}{L}$, которая обычно принимается в качестве параметра гидростатистической устойчивости. Тогда вертикальные градиенты средних полей метеорологических элементов определяются с помощью некоторых функции $\varphi_s(\varsigma)$, $\varphi_q(\varsigma)$ зависящих от безразмерного аргумента ς. Таким образом, знание конкретного вида этих функций позволяет определить турбулентные потоки тепла,

влаги и движения. Используя теорию подобия Монина-Обухова и эмпирические функции Бусинджера [137, 224] запишем систему уравнений приземного слоя:

$$\chi z\frac{\partial|\vec{u}|}{\partial z}=u_*\varphi_u(\varsigma);\quad z\frac{\partial p}{\partial z}=p_*\varphi_\theta(\varsigma);\quad p=\theta,\,q; \tag{4.1}$$

$$p-p_0=p_*f_\theta(\varsigma\varsigma_0);\quad \varsigma=z/L; \tag{4.2}$$

$$v_i=\frac{u_*\chi z}{\varphi_i(\varsigma)};\quad (v_i)_h=\frac{u_*\chi h}{\varphi_i(\varsigma_h)},\quad i=u,\,v; \tag{4.3}$$

$$\varsigma_h=h/L;\quad L_*=\frac{u_*^2}{\lambda\chi^2\theta_*};\quad H_0=\rho c_p\left(v_\theta\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)_0=\rho c_p c_u c_\theta|\vec{u}|_h(\theta_h-\theta_0); \tag{4.4}$$

$$c_u=\chi f_u^{-1}(\varsigma_h,\varsigma_0);\quad c_\theta=\chi f_v^{-1}(\varsigma_h,\varsigma_0);\quad \varsigma_u=\frac{\varsigma_h}{\bar{H}};\quad \varsigma_0=\frac{\varsigma_h}{\bar{H}_z};\quad \bar{H}=\frac{h}{z_u};\quad z=\frac{z_u}{z_\theta}; \tag{4.5}$$

$$f_u(\varsigma,\varsigma_u)=\int_{\varsigma_u}^{\varsigma}\frac{\varphi_u(\xi)}{\xi}d\xi;\quad f_\theta(\varsigma,\varsigma_u)=\int_{\varsigma_0}^{\varsigma}\frac{\varphi_\theta(\xi)}{\xi}d\xi, \tag{4.6}$$

где $|\vec{u}|=(u^2+v^2)^{1/2}$ – модуль вектора скорости; u_* – скорость трения; θ_*, q_* – масштабы потенциальной температуры и удельной влажности; h – высота приземного слоя; χ – постоянная Кармана; z_u, z_θ – параметры шероховатости для ветра и температуры (индексами 0 и h обозначены метеорологические поля при $z=0$ и $z=h$ соответственно); H_0 – поток тепла; H_0c_u, c_θ – коэффициенты трения и теплопередачи соответственно; $H_0\varphi_i$, f_i – непрерывные универсальные функции; $H_0\theta_0$, q_0 – температура и влажность подстилающей поверхности.

Комбинируя формулы (4.1)–(4.2) и принимая $z=h$, получим:

$$h\frac{\partial p}{\partial z}=\frac{\varphi_\theta(\varsigma_h)}{f_\theta(\varsigma_h,\varsigma_0)}(p-p_0);\quad p=(\theta,\,q);\quad h\frac{\partial p}{\partial z}\begin{Bmatrix}u\\v\end{Bmatrix}=\frac{\varphi_u(\varsigma_h)}{f_u(\varsigma_h,\varsigma_0)}\Bigg\}_v^u \tag{4.7}$$

или

$$\alpha\frac{\partial p}{\partial\delta}=\frac{\varphi_\theta(\varsigma_h)}{f_\theta(\varsigma_h,\varsigma_0)}(p-p_0);\quad p=(\theta,\,q);\quad \alpha\frac{\partial p}{\partial\delta}\begin{Bmatrix}u\\v\end{Bmatrix}=\frac{\varphi_u(\varsigma_h)}{f_u(\varsigma_h,\varsigma_0)}\Bigg\}_v^u, \tag{4.8}$$

где $\alpha=\dfrac{h}{\bar{h}(x,y,t)}$.

В дальнейшем формулы (4.8) будут служить краевыми условиями для задач локальных атмосферных процессов области выше приземного слоя, пока в предположении, что θ_0, q_0 известные функции от x, y, t.

При формулировке краевых условий (4.8) на нижней границе воздушной массы было сделано предположение, что температура и влажность подстилающей поверхности θ_0, q_0 заданы. Для прогностических задач это предположение довольно грубо, и поэтому для замыкания системы уравнений нужно сформулировать

модель таким образом, чтобы температура и влажность подстилающей поверхности определялись наряду с другими метеоэлементами. Наиболее обоснованный в настоящее время подход к решению этой задачи состоит в формулировке совместной модели динамики пограничного слоя атмосферы во взаимодействии термически и орографический неоднородной подстилающей поверхностью. Для суши это модель температурного режима почвы с уравнением баланса тепла на границе с атмосферой и модель влагообмена.

Для простоты над водной поверхностью будем считать функции θ_0, q_0 заданными:

$$\theta_0 - f_0(t); \quad q = 0{,}622 \cdot E_0(\theta_0)/p, \tag{4.9}$$

где E_0 – упругость насыщения водяного пара при температуре θ_0; p – атмосферное давление; $f_0(t)$ – температура поверхности воды.

Распределение температуры в почве описывается уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \eta} K_s \frac{\partial T}{\partial \eta}, \tag{4.10}$$

где $T = \overline{T} + T'$ – абсолютная температура почвы; T' – отклонения температуры почвы от среднесуточного значения, $\overline{T} = \text{const}$; $K_s(x, y, z)$ – коэффициент температуропроводности почвы предполагается заданным.

В качестве условии на поверхности Земли примем уравнение баланса тепла, которое имеет вид:

$$G_s - \rho c_p \left(v_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_0 - a_s \rho L_w \left(v_q \frac{\partial q}{\partial z} \right)_0 = I_0 \cdot (1 - A_s) + J_s - F_s, \tag{4.11}$$

где $G_s = \lambda_s \left(\dfrac{\partial T}{\partial z} \right)_s$ – теплопередача через поверхность почвы (индексом «0» отмечены величины, при $z = 0$); $\lambda_s = c_s \rho_s K_s$, ρ_s, c_s, K_s – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент температуропроводности почвы; ρ – плотность воздуха; I_0 – приток суммарной коротковолновой солнечной радиации; A_s – альбедо подстилающей поверхности; F_s – эффективное длинноволновое излучение; a_s – безразмерный коэффициент, позволяющий учитывать тот факт, что в разных точках подстилающей поверхности, в следствие ее неоднородности, на испарения или конденсацию тратится неодинаковое количество тепла; $J_s(x, y, t)$ – функция, описывающая антропогенные источники тепла.

При штилевых температурах перепад температуры между уровнями $z = 0$ и $z = z_\theta$ может достигать довольно больших значений. Поэтому, при решении (4.11) используется полуэмпирическая параметризационная формула для вязкого подслоя [37]:

$$\theta_c - \theta_0 = 0{,}0962 \cdot \theta_* \left(\frac{u_* z_0}{\nu} \right)^{0{,}45}. \tag{4.12}$$

Уравнение (4.11) является краевым условием для (4.10) при $z = 0$. Второе граничное условие для (4.10) задается на глубине $H_\text{П}$, где отсутствует суточное колебание температуры в почве, т.е.:

$$T = T_\text{П} \quad \text{при } z = -H_\text{П}. \tag{4.13}$$

Метод решения уравнения (4.10) с краевыми условиями (4.11), (4.13) рассмотрен в [27, 37]. Следуя [27, 37, 52], выпишем конечно-разностный аналог потока тепла в почву:

$$G_s = \lambda_s \frac{T_s - T_1}{\Delta\eta_1}, \tag{4.14}$$

где $\Delta\eta_1$ – шаг сетки по глубине; $\Delta\eta_1$ T_1 – значение температуры почвы на первом расчетном уровне.

Уравнение (4.10) решается численно, используя метод прогонки. Опуская промежуточные выкладки, представим решение в виде [27, 52]:

$$T_1 = \beta_1 T_s + z_1, \tag{4.15}$$

где β_1, z_1 – прогоночные коэффициенты.

Подставляя (4.15) в (4.14), решение уравнения (4.11) представим в виде:

$$\theta_0 = \frac{\tilde{\theta} + \tilde{c}F\theta_h}{1 + \tilde{c}F}, \tag{4.16}$$

где $F = \left[A - L_w + 4 \cdot \left(\frac{F_s}{T_s} \right)^{n-1} - \lambda_s (\beta_1 - 1) \right]^{-1}$;

$$\tilde{c} = \left[Ac_p + 4 \cdot \left(\frac{F_s}{T_s} \right)^{n-1} - \frac{\lambda_s \theta_0^{n-1} (\beta_1 - 1)}{\Delta\eta_1} \right] \cdot \frac{0{,}0962 \cdot c_\theta \left(c_u \left| \frac{r}{u} \right|_h z_\theta / \nu \right)^{0{,}45}}{\chi};$$

$$\theta_0 = \tilde{\theta}_0^{n-1} + F \left[I_0 (1 - A_s) - F_s^{n-1} + \lambda_s \theta_s^{n-1} \frac{1 - \beta_1}{\Delta\eta_1} \right] +$$

$$+ J_s + a_s AFL_w \left(q_h - q_0^{n-1} \right) + a_s A\mu F \left(\theta_0 - \theta_s \right)^{n-1}.$$

Таким образом, по вычисленному значению θ_0, из (4.1,12) можно определить температуру θ_s. На практике для расчетов приземных характеристик используются следующие эмпирические формулы:

Формула Альбрехта [40]:

$$I_0 = a_0 \sin z_c - b_0 \sqrt{\sin z_c}, \quad I_0 \geq 0; \tag{4.17}$$

$$\sin z_c = \sin\varphi \sin\psi + \cos\varphi \cos\psi \cos\gamma; \quad \gamma = (t - 12)\pi/12,$$

где z_c – зенитный угол Солнца; φ – широта местности; γ – часовой угол Солнца; ψ – склонение Солнца; a_0, b_0 – заданные константы.

Формула Брендта [40]:

$$F_s = \delta f_s T_0^4 \left(a_e + b_e \sqrt{e} \right), \tag{4.18}$$

где δ – постоянная Стефана-Больцмана; f_s – коэффициент серости почвы; a_e, b_e – эмпирические константы; e – упругость водяного пара.

Формула Чарнока для определения параметра шероховатости над водой:

$$z_0 = \frac{0{,}035u_*^2}{g}. \tag{4.19}$$

Формула Магнуса [40]:

$$q_H(T) = \frac{0{,}622}{\rho} \cdot 6{,}11 \cdot \exp\left[\frac{17{,}55 \cdot (T - 273{,}15)}{T - 31{,}25}\right]. \tag{4.20}$$

Надо отметить, что формула Альбрехта пригодна для расчета потока солнечной радиации для ровной местности. Известно, что температура приземного слоя воздуха и суммарное испарение увлажненной поверхности зависят от инсоляции деятельной поверхности. Следовательно, различие в инсоляции склонов, в зависимости от их экспозиции, могут привести в условиях орографической неоднородности подстилающей поверхности к значительным мезометрологическим контрастам. Поэтому для расчета потока солнечной радиации на поверхность склона используем формулу [18]:

$$S_h = S_0 \cos\alpha, \tag{4.21}$$

где

$$\cos\alpha = \sin z_c \cos\alpha_r + \cos\psi_\alpha \cdot (\sin\varphi\cos\varphi\cos\gamma - \sin\varphi\cos\psi_\alpha\cos\psi) \times$$
$$\times \sin\alpha_r + \sin\psi_\alpha\cos\psi\sin\gamma\sin\alpha_r;$$

S_0 – солнечная постоянная; α_r – угол падения солнечных лучей на поверхность; ψ_α – азимут проекции нормали к склону на горизонтальную поверхность, отсчитываемый от плоскости меридиана (ψ_α считается положительным при отсчете с юга по часовой стрелке).

Функции α_r, ψ_α вычислим следующим образом:

$$\alpha_r = \operatorname{arctg}\left[\left(\delta_x^2 + \delta_y^2\right)^{1/2}\right]; \quad \psi_\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{\delta_x}{\delta_y}\right) + k\pi. \tag{4.22}$$

Значение параметра k меняется в зависимости от ориентации склона. По аналогии с (4.17) выпишем формулу для S_r – потока суммарной радиации на наклонную поверхность:

$$S_r = a_0 \cos\alpha - b_0\sqrt{\cos\alpha}. \tag{4.23}$$

Нетрудно видеть, что при $\alpha_r = 0$ формулы (4.23) и (4.17) совпадают.

4.1.2. Поток тепла и влаги в почву

Во многих численных моделях динамики атмосферы для нахождения температуры почвы используется уравнение теплового баланса. Теплофизические характеристики почвы разнообразны, в результате чего даже в небольших расстояниях температуры над различными типами почвы могут резко различаться и тем самым влиять на динамику атмосферы в нижних слоях. Кроме того, тепловой и влажностные режимы в системе почва – воздух из-за взаимной связи между

собой воздействуют на формирование и развитие растений и тем самым влияют на окружающую среду.

В настоящее время решение такой комплексной задачи удается получить благодаря ряду упрощений. Тем не менее, имеется несколько физических моделей, которые качественно правильно отражают ход естественных процессов [381, 382]. Ясно, что тепловой режим в почве может быть наиболее полном описан на основе совместного рассмотрения процессов молекулярной теплопроводности почве и турбулентной теплопроводности в области приземного слоя атмосферы. В рамках одномерной модели пограничного слоя эти работы использовались в работах [381, 382].

Теперь, как и в [381], рассмотрим процессы теплообмена в почве с учетом термодинамического состояния почвенной среды совместно с пространственной моделью пограничного слоя атмосферы. Исходным для нахождения температуры на поверхности земли является уравнение теплового баланса (4.11). Для определения тепловых и влажностных характеристик почвы рассмотрим следующее уравнение:

$$c\frac{\partial T}{\partial t}-\frac{\partial}{\partial z}\lambda\frac{\partial T_s}{\partial z}=0. \tag{4.24}$$

Здесь С – теплоемкость почвы, задаваемая по формуле:

$$c=\left(1+\overline{\eta}_s\right)c_i+\overline{\eta}_i, \tag{4.25}$$

где $\overline{\eta}_i$ – объемное влагосодержание; а $\overline{\eta}_s$ – насыщающая влага или пористость почвы; c_i – теплоемкость сухого грунта для соответствующего почвенного типа *i*.

В уравнении (4.25) теплоемкость воздуха не учитывается из-за ее малости. Коэффициент теплопроводности λ определяются с помощью следующих эмпирических формул, полученных из аппроксимации эмпирических данных [107]:

$$\lambda=\begin{cases}e^{-(p_f+2{,}7)} & p_f\le 5{,}1;\\ 0{,}00 & p_f>5{,}1,\end{cases} \tag{4.26}$$

где $p_f=\log\left(\overline{\psi}\right)$; $\overline{\psi}$ – потенциал влаги в почве.

Здесь, как и в модели квазиоднородного приземного слоя, однородность почвы по горизонтали предполагается только в пределах одной ячейки сеточной области.

Отметим, что потенциал влаги соответствует верхнему горизонту воды и представляет собой работу против капиллярных сил и силы сопротивления, затрачиваемую на выделение воды из почвы. Из анализа экспериментальных данных получено, что связь между коэффициентом теплопроводности и потенциалом влаги слабо зависит от типа почвы.

Распределение количества влаги в почве η определим из уравнения:

$$\rho_w\frac{\partial\eta}{\partial t}-\frac{\partial Q_s}{\partial z}=0, \tag{4.27}$$

где

$$Q_s=K_\eta\rho_w\frac{\partial\left(\overline{\psi}+z\right)}{\partial z} \tag{4.28}$$

или
$$Q_s = D_\eta \rho_w \frac{\partial \eta}{\partial z} + K_\eta \rho_w;\ D_\eta = K_\eta \frac{\partial \psi}{\partial \eta}; \tag{4.29}$$

Q_s – поток влаги в почве; K_η – гидравлическая проводимость; ρ_w – плотность воды; z – вертикальная координата, определяемая как и в атмосфере; D_η – коэффициент диффузии.

Следуя [381] определим переменные K_η, $\overline{\psi}$, D_η с помощью формул:

$$\overline{\psi} = \overline{\psi}_H \left(\frac{\overline{\eta}_s}{\overline{\eta}} \right)^b; \tag{4.30}$$

$$K_\eta = K_{\eta H} \left(\frac{\overline{\eta}}{\overline{\eta}_H} \right)^{2b+3}; \tag{4.31}$$

$$D_\eta = K_{\eta H} \left(\frac{\overline{\eta}}{\overline{\eta}_s} \right)^{b+3}, \tag{4.32}$$

где индексом «Н» отмечены значения соответствующих функции в условиях насыщения.

Одним из основных искомых параметров является относительная влажность или потенциал поверхности влаги. Связь между ними при равновесии представим в виде:

$$\eta_0 = e^{-\left(g\overline{\psi}_H / RT_{3em} \right)}. \tag{4.33}$$

Тогда удельная влажность на поверхности земли равна:

$$q_{3em} = \eta_0 q_H, \tag{4.34}$$

а q_H находится из формулы Магнуса (4.20).

Изменение влажности почвы влечет за собой изменение баланса радиации на поверхности земли из-за изменения альбедо подстилающей поверхности. С увеличением влажности альбедо уменьшается. Альбедо A_s на поверхности почвы в первом приближении определим с помощью следующих эмпирических формул [101]:

– для чернозема:

$$A_s = \begin{cases} 0{,}31...0{,}34\,\eta/\eta_s & \eta/\eta_s \le 0{,}5; \\ 0{,}14 & \eta/\eta_s > 0{,}5; \end{cases} \tag{4.35}$$

– для торфа:

$$A_s = \begin{cases} 0{,}14 \cdot \left(1 - \eta/\eta_s\right) & \eta/\eta_s \le 0{,}5; \\ 0{,}07 & \eta/\eta_s > 0{,}5. \end{cases}$$

Общее альбедо подстилающей поверхности можно представить в виде:

$$A'_s = A_s + A', \tag{4.36}$$

где A' учитывает зависимость зенитного угла солнца следующим образом:

$$A'_s = 10^{-2} \left[\exp\left(z_c a \right)^\alpha - 1 \right], \tag{4.37}$$

z_c – зенитный угол солнца; $a = 0{,}0003286$; $\alpha = 1{,}5$. Теперь с учетом уравнения теплового баланса (4.11) необходимо согласовать поток влаги Q_s, идущий из почвы

к поверхности земли, и турбулентный поток влаги, поступающий из почвы в атмосферу $Q_1 = \rho u_* q_*$. Для этого достаточно потребовать, чтобы

$$Q_1 = Q_s. \tag{4.38}$$

Замыкание системы уравнений гидротермодинамики относительно оператора турбулентного обмена производится согласно п. 3.1.4 раздела 3.

В силу этих обстоятельств модель атмосферных процессов и климата представим в системе нелинейных дифференциальных уравнений гидродинамики турбулентной атмосферы и диффузии примесей [4]:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p_a}{\partial x} + K_x + \Delta u; \quad \frac{dr}{dt} = -\frac{1}{\rho\partial}\frac{\partial p_a}{y} + K_y + \Delta v;$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho\partial}\frac{\partial p_a}{z} + K_z + \Delta w - g; \tag{4.39}$$

$$\frac{dp}{dt} + \rho div V = 0;$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\Delta\theta + \frac{1}{c_p\rho}\left(\varepsilon_\pi + \varepsilon_\Phi\right); \quad \frac{dq}{dt} = \Delta q - \frac{m}{\rho}; \quad \frac{d\delta}{dt} + \frac{d\delta V_\delta}{\partial z} = m + \Delta\delta;$$

$$\frac{dc^T}{dt} + \frac{dc^T V_c}{\partial z} = \Delta c^T - \alpha_c c^T; \quad \frac{dc^r}{dt} = \Delta c^r - \alpha_c c^r; \quad p_A = \rho RT; \quad \theta = T\left(\frac{1000}{p_A}\right)^{\frac{c_p - c_v}{c_p}},$$

где t – время; u, v, w – компоненты скорости ветра $\vec{V}$ вдоль декартовых осей x, y, z соответственно; p_A – атмосферное давление; ρ – плотность воздуха; g – ускорение силы тяжести; K_x, K_y, K_z – компоненты силы Кориолиса $K = -2\left[\vec{\omega},\vec{V}\right]$, (где ω – угловая скорость вращения Земли); T – температура; θ – потенциальная температура; c_p, c_v – удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме соответственно; q – удельная влажность воздуха; δ – водность воздуха; c^T – концентрация твердых примесей; V_δ – скорость опускание жидкой влаги; V_c – скорость опускание твердых примесей; c^v – концентрация газообразных примесей; m – скорость конденсации (испарения) влаги; ε_π – лучистый приток тепла; $\varepsilon_\Phi = \Phi_T$ – фазовый приток тепла (где Φ – удельная теплота парообразования); R – удельная газовая постоянная сухого воздуха; $\alpha_{\tilde{n}}$ – коэффициент, определяющий изменения концентрации за счет химических превращений примесей.

Скорость фазовых переходов влаги m в случае термодинамического процесса в воздухе, насыщенном водяным паром, может быть определена по формуле:

$$m = -\frac{dq_{\text{НАС}}}{dt} + \frac{q_{\text{НАС}}}{\theta}\frac{d\theta}{dt}, \tag{4.40}$$

где

$$q_{\text{НАС}} = \frac{0{,}622\,E_{\text{НАС}}}{p_A}; \quad E_{\text{НАС}} = 6{,}1\cdot 10^{\frac{7{,}45\,(T-273)}{T-38}}, \tag{4.41}$$

где $q_{\text{НАС}}$ – удельная влажность насыщения; $E_{\text{НАС}}$ – упругость насыщения водяного пара.

Лучистый приток тепла ε_π представляет собой дивергенцию результирующего потока Ф*:*

$$\varepsilon_\pi = \frac{d\Phi}{dz}; \quad \Phi = J\downarrow - J\uparrow - U + G, \tag{4.42}$$

где $J\downarrow$, $J\uparrow$ – нисходящий и восходящий потоки коротковолновой радиации; G, U – нисходящий и восходящий потоки длинноволновой радиации, которые описываются интегродифференциальными уравнениями переноса излучения [4]. Скорость опускания тяжелой сохраняющейся примеси V_c и водяных капель V_k радиусом $10^{-5} - 5\cdot10^{-3}$ может быть определена по известной формуле Стокса для сферических частиц [5]:

$$V_c = \frac{2\rho_c g}{9\eta} r_c^2; \tag{4.43}$$

$$V_k = \frac{2\rho_k g}{9\eta} r_k^2, \tag{4.44}$$

где ρ_c, ρ_k – плотности примеси, капли; r_c, r_k – радиусы частиц примеси, капли; g – ускорение силы тяжести; η – коэффициент молекулярной вязкости воздуха.

Для крупных частиц примеси в формулу (4.43) вводят поправочный коэффициент $1 + \frac{3}{16}\mathrm{Re}$, где $\mathrm{Re} = \frac{2r_c V_c}{\eta}$ [7]. А для капель воды радиусом 0,5 мм и более применяют эмпирические зависимости скорости падения капли от эквивалентного радиуса капли (радиуса шара, объем которого равен объему деформированной капли) [5].

Для расчета скорости опускания влаги в атмосфере V_δ вводят понятие средневзвешенной (по массе) скорости падения облачных капель:

$$V_\delta = \frac{\int_0^\infty r_k^3 f(r_k) V_k(r_k) dr_k}{\int_0^\infty r^3 f(r_k) dr_k}, \tag{4.45}$$

где $f(r_k)$ – функция распределения капель по размерам.

В уравнениях (4.39) используется операторы:

$$\Delta = \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} D_z \frac{\partial}{\partial z};$$

$$\frac{d}{dt} = u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y} + w\frac{\partial}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial t},$$

где D_x, D_y, D_z – коэффициенты турбулентной диффузии по осям x, y, z.

Связь тепловых режимов атмосферы и деятельного слоя почвы осуществляется с помощью уравнения теплового баланса земной поверхности (уравнения притока тепла, записанного для очень тонкого слоя) [5]:

$$l_0 \frac{\partial}{\partial t}\left(c^* \rho^* T\right) + \Phi_{\Pi\Lambda} \rho^* \frac{\partial l_0}{\partial t} = (1-r) J_0 - \left[1 - \exp\left(-\frac{l_0}{\xi_1^*}\right)\right] + \\ + aG_A - U_0\left[1 - \exp\left(-\frac{l_0}{\xi_3^*}\right)\right] + c_p \rho D_z \left.\frac{\partial \theta}{\partial z}\right|_{z=0} + \Phi_p D_z \left.\frac{\partial q}{\partial z}\right|_{z=0} + c^* \rho^* K_M \left.\frac{\partial T}{\partial \xi}\right|_{\xi = l_0}, \tag{4.46}$$

где T – температура слоя почвы; l_0 – толщина слоя; c^* – удельная теплоемкость почвы; ρ^* – плотность почвы; K_M – коэффициент молекулярной температуропроводности; $\Phi_{\Pi\Lambda}$ – удельная теплота плавления; r – альбедо поверхности почвы; a – коэффициент поглощения (излучения) почвы; $J_0\downarrow$ – коротковолновая радиация, приходящая к поверхности почвы; G_A – противоизлучения атмосферы; U_0 – излучение земной поверхности; $\xi_i^* = \dfrac{1}{a_i \rho^*}$ (i = 1, 2, 3) – глубины, на которых потоки радиации $J_0\downarrow$, G_A, U_0 убывают в «е» раз по сравнению с соответствующими потоками при $\xi = 0$; a_i – коэффициенты поглощения слоя почвы для $J_0\downarrow$, G_A, U_0.

Процесс распределения тепла в глубь почвы путем молекулярной теплопроводности описывается уравнением теплопроводности почвы (или уравнением притока тепла), которое имеет вид [5]:

$$c^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho^*} \frac{\partial}{\partial \xi} \lambda \frac{\partial T}{\partial \xi}, \tag{4.47}$$

где c^* – удельная теплоемкость почвы; ρ^* – плотность почвы; λ – коэффициент теплопроводности почвы; ξ – глубина от поверхности почвы.

Уравнение (4.47) справедливо для сухих или насыщенных влагой почв. В ненасыщенной почве необходимо учитывать взаимосвязанный характер переноса влаги и тепла [6]:

$$\rho^* c^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \xi} + \rho^* D_B^T \frac{\partial W_B}{\partial \xi} + \rho^* D_\Pi^T \frac{\partial W_\Pi}{\partial \xi}\right) - \Phi m_0; \\ \rho^* \frac{\partial W_B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi}\left(\lambda_B \frac{\partial T}{\partial \xi} + \rho^* D_B \frac{\partial W_B}{\partial \xi}\right) - m_0 + J\Delta(\xi); \tag{4.48} \\ \rho^* \frac{\partial W_\Pi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_\Pi \frac{\partial T}{\partial \xi} + \rho^* D_\Pi \frac{\partial W_\Pi}{\partial \xi}\right) + m_0,$$

где W_B, W_Π – удельная влажность жидкости и пара соответственно; λ_B, λ_Π – коэффициенты термовлагопроводности; D_B, D_Π – коэффициенты диффузии; D_B^T, D_Π^T – коэффициенты влаготермопроводности; m_0 – объемный источник, отражающие взаимные фазовые переходы жидкости и пара; J – интенсивность осадков; $\Delta(\xi)$ – дельта-функция.

В большинстве реальных случаев для почвы выполняется соотношения [6]:

$$W_{\text{П}} = W_{\text{НАС}}(T) = 4{,}85 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(0{,}06T)\frac{\Pi\rho_{\text{В}} - \rho^* W_{\text{В}}}{\rho_{\text{В}}}, \tag{4.49}$$

где П – пористость почвы; $\rho_{\text{В}}$ – плотность воды.

Связь режимов влаги атмосферы и почвы осуществляется с помощью уравнения баланса влаги земной поверхности:

$$\begin{aligned}\rho^* l_0 \frac{\partial}{\partial t}\left(W_{\text{В}} + W_{\text{П}}\right) &= \left| J + \rho D_z \frac{\partial q}{\partial z} + \rho D_z \frac{\partial \delta}{\partial z}\right|_{z=0} + \\ &+ \left|\left(\lambda_{\text{В}} + \lambda_{\text{П}}\right)\frac{\partial T}{\partial \xi} + \rho^* D_{\text{В}} \frac{\partial W_{\text{В}}}{\partial \xi} + \rho^* D_{\text{П}} \frac{\partial W_{\text{П}}}{\partial \xi}\right|_{\xi = l_0}.\end{aligned} \tag{4.50}$$

Интенсивность осадков связана с микрофизическим строением облаков и их вертикальной мощностью Δz. Получена эмпирическая зависимость J от Δz [5].

Для толщины облака Δz, в свою очередь существуют эмпирические взаимосвязи с водностью облака δ и температурой на нижней границе $T_{\text{НГ}}$ [5].

Система уравнений (4.39)–(4.50) описывает метеорологические явления всех масштабов, в том числе и локального. Однако, в общем случае, численные методы решения связанных с ней задач оказываются чрезвычайно громоздкими и неприемлемыми для современных ЭВМ.

Для перехода к блочной модели проще всего воспользоваться в теории [1] операцией осреднения переменных и уравнений по пространственным координатам для выделенных блоков модели и далее описать взаимодействия каждого блока с соседними.

4.2. Вывод уравнений блочной модели переноса вредных примесей в приземном слое атмосферы и описание взаимодействий между блоками

Для эффективного исследования сложного объекта математическими методами требуется иметь комплекс моделей различных уровней и детализации. Это взаимодействие различное (расшифровка, детальная интерпретация в подобных моделях, решение принятых с помощью ориентированных моделей верхнего уровня и эксперименты с моделями нижнего уровня с целью уточнения параметров моделей верхнего уровня и т.д.). Когда требуется поставить массовые машинные эксперименты с готовой моделью с целью формирования необходимой статистики для решения поставленной задачи, громоздкость, детальность модели не позволяют это сделать при имеющихся вычислительных средствах. Тогда желательно построить менее подробную и точную, но существенно более операбельную модель с помощью имеющейся и уже с ней проводить массовые эксперименты. Доказательство этого существующие модели водной и воздушной среды, которые были использованы в разделах 2 и 3. Они являются развитием известных в механике и физике гидродинамических моделей, дополненных моделями термодинамических и иных явлений, позволяющие вести весьма точные расчеты характеристик гидродинамических, метеорологических, климатических

явлений при полностью заданных исходных данных (входах). Эти характеристики необходимы для многих моделей природной среды разных временных и пространственных масштабов и далеко не всегда могут быть получены из несистематизированных наблюдений, какими располагает наука: систематизированные в должной мере наблюдения таких распределенных объектов чрезвычайно дорогостоящи и далеко не всегда осуществимы имеющейся аппаратурой. Дело осложняется тем, что входные факторы (метеорологические условия) имеет случайный характер, и получение устойчивых характеристик может быть обеспечено лишь достаточно большими статистическими выборами, что весьма трудно реализовать путем, как наблюдений, так и расчетов на громоздких моделях. Вполне разумно в такой ситуации переходить от распределенных моделей к приближенным блочным моделям, поскольку основным фактором, определяющим большие объемы вычислений является распределенность объекта. Рассмотрим процедуру построения блочной модели локального климата, ее взаимодействия и принципы разбиения области моделирования. Понятие локального климата охватывает процессы и явления, имеющиеся горизонтальные масштабы от нескольких сотен метров до нескольких сотен километров с характерным масштабом по времени от нескольких часов до 3–4 суток. Процессы типа образования «острова тепла» над городом или крупным центром производства энергии, где действует одновременно много факторов одного порядка. Вертикальный масштаб таких явлений от 1 до 2 км, в некоторых случаях до 10 км (кучевая облачность). Поэтому вполне естественно выделить пространственные области моделируемой области как цилиндрические и разделить на ячейки.

При вертикальном делении, прежде всего, выделяем пограничный слой (1,5–2 км), в котором вертикальные элементы метеоэлементов намного больше соответствующих значений в свободной атмосфере (2–10 км) [2]. Внутри пограничного слоя его нижняя часть, приземный слой (50–100 м), обладает особым свойством – постоянством с высотой турбулентных потоков количества движения, тепла, водяного пара, коллоидных примесей. Толщина приземного и пограничного слоя меняется в зависимости от скорости ветра, шероховатости земной поверхности и устойчивости стратификации атмосферы [3].

Слой почвы можно разделить на три части: поверхность почвы, являющейся границей двух сред; слой суточных колебаний температуры (~1 м); слой годовых колебаний температуры (~10 м). Толщина выделенных в почве слоев зависит от свойств почвы [2].

Выделенные слои внутри каждой ячейки образует блоки. Между ними происходит горизонтальный и вертикальный обмен веществом и энергией. Рассматриваются средние значения переменных внутри каждого блока, и с их помощью описываются основные метеорологические процессы, формирующие мезоклимат в ячейке, и взаимодействие с соседними по горизонтали ячейками.

Неизвестных функций в уравнениях гидродинамики турбулентной атмосферы и диффузии примесей (4.39)–(4.50) параграфа 4,1 представим в виде суммы:

$$Y(t,x,y,z) = \overline{Y}(t) + Y'(t,x,y,z),$$

где $\overline{Y}(t) = \frac{1}{\sigma}\iiint\limits_{(\sigma)} Y(t,x,y,z)\,dxdydz$ – среднее значение функции в камере (σ – объем блока), а $Y'(t, x, y, z)$ – отклонение от среднего внутри блока. И затем усредним

уравнения гидродинамики турбулентной атмосферы и диффузии примесей [4] по объему блока σ, используя свойства операции осреднения [1]:

$$\overline{A\xi + B\xi} = A\overline{\xi} + B\overline{\varphi}; \quad \overline{\overline{\xi}\varphi} = \overline{\xi}\overline{\varphi}; \quad \frac{\overline{\partial\xi}}{\partial s} = \frac{\partial\overline{\xi}}{\partial s}; \quad \overline{\xi'} = 0,$$

где ξ, φ – функции независимых переменных x, y, z, t; A, B – постоянные; s – любая из этих независимых переменных.

Покажем на примере первого уравнения системы гидродинамики турбулентной атмосферы и диффузии примесей [4] производимые действия:

$$\overline{\frac{\partial(\overline{u}+u')}{\partial t} + (\overline{u}+u')\frac{\partial(\overline{u}+u')}{\partial x} + (\overline{v}+v')\frac{\partial(\overline{u}+u')}{\partial y} + (\overline{w}+w')\frac{\partial(\overline{u}+u')}{\partial z}} =$$

$$= \overline{-\frac{1}{(\overline{\rho}+\rho')}\frac{\partial\left(\overline{p_A}+p'_A\right)}{\partial x} + K_x + \frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{D_x}+D'_x\right)\frac{\partial(\overline{u}+u')}{\partial x} +}$$

$$+\overline{\frac{\partial}{\partial y}\left(\overline{D_y}+D'_y\right)\frac{\partial(\overline{u}+u')}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{D_z}+D'_z\right)\frac{\partial(\overline{u}+u')}{\partial z}};$$

$$\frac{\partial(\overline{u}+u')}{\partial t} = \frac{\overline{\partial(\overline{u}+u')}}{dt} = \frac{\partial\overline{u}}{dt}; \quad \overline{(\overline{u}+u')\frac{\partial(\overline{u}+u')}{\partial x}} = \overline{u}\,\overline{\frac{\partial\overline{u}}{dx}} + \overline{u}\,\overline{\frac{\partial u'}{dx}} + \overline{u'\frac{\partial\overline{u}}{dx}} + \overline{u'\frac{\partial u'}{dx}} = \overline{u'\frac{\partial u'}{dx}}.$$

Аналогично $\overline{(\overline{v}+v')\frac{(\overline{u}+u')}{\partial y}} = \overline{v'\frac{\partial u'}{\partial y}}; \quad \overline{(\overline{w}+w')\frac{\partial(\overline{u}+u')}{\partial z}} = \overline{w'\frac{\partial u'}{\partial z}};$

$$\overline{\frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{D_x}+D'_x\right)\frac{\partial(\overline{u}+u')}{\partial x}} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{\overline{D_x}\frac{\partial\overline{u}}{\partial x}} + \overline{\overline{D_x}\frac{u'}{\partial x}} + \overline{D'_x\frac{\partial\overline{u}}{\partial x}} + \overline{D'_x\frac{u'}{\partial x}}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{D'_x\frac{u'}{\partial x}}\right).$$

Аналогично $\overline{\frac{\partial}{\partial y}\left(\overline{D_y}+D'_y\right)\frac{\partial(\overline{u}+u')}{\partial y}} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\overline{D'_y\frac{\partial u'}{\partial y}}\right);$

$$\overline{\frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{D_z}+D'_z\right)\frac{\partial(\overline{u}+u')}{\partial z}} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{D'_z\frac{\partial u'}{\partial z}}\right).$$

Пренебрегая пульсациями плотности ($\rho' = 0$), получим:

$$\overline{\frac{1}{\overline{\rho}}\frac{\partial\left(\overline{p_A}+p'_A\right)}{\partial x}} = \overline{\frac{1}{\overline{\rho}}\frac{\partial\overline{p_A}}{\partial x}} + \overline{\frac{1}{\overline{\rho}}\frac{\partial p'_A}{\partial x}} = 0.$$

В данной модели плотность воздуха ρ считается меняющейся только по высоте и определяется как средняя интегральная плотность слоя Δz по формуле:

$$\overline{\rho} = \frac{1}{\Delta z}\int_z^{z+\Delta z}\rho(\xi)d\xi,$$

где $\rho(\xi)$ задается таблично по многолетним средним данным значений давления и плотности на различных высотах [2]. Обозначая

$$A^u = \overline{u'\frac{\partial u'}{\partial x}} + \overline{v'\frac{\partial u'}{\partial y}} + \overline{w'\frac{\partial u'}{\partial z}}; \quad dif^u = \frac{\partial}{\partial x}\left(\overline{D'_x\frac{u'}{\partial x}}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\overline{D'_y\frac{\partial u'}{\partial y}}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{D'_z\frac{\partial u'}{\partial z}}\right),$$

получим следующий вид первого уравнения системы (4.47)–(4.58):

$$\frac{d\overline{u}}{dt} + A^u = \overline{K_x} + dif^u.$$

Поступая подобным образом с остальными уравнениями системы (4.39)–(4.50), придем к следующей системе уравнений для средних значений неизвестных функций в блоке модели:

$$\begin{gathered}
\frac{d\overline{u}}{dt} + A^u = \overline{K_x} + dif^u; \\
\frac{d\overline{v}}{dt} + A^v = \overline{K_y} + dif^v; \\
\frac{d\overline{w}}{dt} + A^w = \overline{K_z} + dif^w - g; \\
\frac{d\overline{\theta}}{dt} + A^\theta = dif^\theta + \frac{1}{c_p\overline{\rho}}\left(\overline{\varepsilon_\pi} + \overline{\varepsilon_\varphi}\right); \\
\frac{d\overline{q}}{dt} + A^q = dif^q - \frac{\overline{m}}{\overline{\rho}}; \\
\frac{d\overline{\delta}}{dt} + A^\delta + R^\delta = \overline{m}; \\
\frac{d\overline{c^T}}{dt} + A^{c^T} + R^{c^T} = dif^{c^T} - \alpha_c^T\overline{c^T}; \\
\frac{d\overline{c^\Gamma}}{dt} + A^{c^\Gamma} = dif^{c^\Gamma} - \alpha_c^\Gamma\overline{c^\Gamma}.
\end{gathered} \tag{4.51}$$

Здесь $R^\delta = \overline{\frac{\partial\delta'\overline{V}\delta}{\partial z}}$; $\quad R^{c^T} = \overline{\frac{\partial c^{T\prime}V_c}{\partial z}}$.

Члены A^Y и dif^Y, где $Y = (u, v, w, \theta, q, \delta, c^T, c^\Gamma)$, обусловливают адвективные (конвективные) и диффузионные изменения средних значений неизвестных функции блока. Эти изменения возникают, очевидно, в результате взаимодействия рассматриваемого блока с соседними. Для блока в почве в результате осреднения аналогичным способом получаем уравнения (без учета термического влагопереноса):

$$\rho^* C^* \frac{\overline{\partial T}}{\partial t} = dif^T - \Phi\overline{m_0};$$

$$\rho^* \frac{\overline{\partial W_{\text{В}}}}{\partial t} = dif^{W_{\text{В}}} - \overline{m_0} + J\Delta(\xi); \tag{4.52}$$

$$\rho^* \frac{\overline{\partial W_{\text{П}}}}{\partial t} = dif^{W_{\text{П}}} + \overline{m_0}; \quad \overline{W_{\text{П}}} = 4{,}85 \cdot 10^{-4} \exp\left(0{,}06\overline{T}\right) \frac{\Pi\rho_{\text{В}} - \rho^* \overline{W_{\text{В}}}}{\rho_{\text{В}}}.$$

Уравнения теплового баланса земной поверхности нет необходимости осреднять, так как оно записано для слоя конечной длины l_0. Обозначим три первых члена правой части через $\varepsilon_{\pi 0}$, а члены обуславливающий диффузионные изменения температуры поверхности, через dif_0^{θ}, dif_0^{q}, dif_0^{T}. Тогда уравнения теплового баланса земной поверхности примет вид:

$$l_0 c^* \rho^* \frac{\partial T_0}{\partial t} + \Phi_{\text{ПА}} \rho^* \frac{\partial l_0}{\partial t} + \varepsilon_{\pi 0} + dif_0^{\theta} + dif_0^{q} + dif_0^{T}. \tag{4.53}$$

Уравнение баланса влаги земной поверхности также остается без изменения и лишь в новых обозначениях примет вид (без учета термического влагопереноса):

$$l_0 \rho^* \frac{\partial}{\partial t}\left(W_{\text{В}_0} + W_{\text{П}_0}\right) = J + dif_0^{q} + dif_0^{\delta} + dif_0^{W_{\text{ВП}}} + dif_0^{W}. \tag{4.54}$$

Система уравнений (4.51)–(4.54) описывает изменение во времени средних значений метеоэлементов в каждой из выбранных блоков. Определив члены, отражающие взаимодействие между блоками (A^Y, dif^Y, R^{δ}, R^{c^T}), получим основные уравнения предлагаемой блочной модели.

Изменение субстанции Y в камере непосредственно определяется разностью потоков входящего Q_U и исходящего Q (притоком):

$$\rho \frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{Q - Q_U}{L},$$

где L – длина камеры по нормали к площадке.

Для конвективного и адвективного притоков A^Y субстанции Y к камере легко получить:

$$A^Y = \frac{dY}{dt} = -\frac{1}{\rho L}\left(\rho Y\overline{V} - \rho_U U\overline{V}_U\right), \tag{4.55}$$

где $Y = (\theta, q, \delta, c^T, c^{\Gamma}, u, v, w)$; $U = \left(\theta_U, q_U, \delta_U, c_U^T, c_U^{\Gamma}, u_U, v_U, w_U\right)$; $\overline{V}$ – средняя скорость перемещения субстанции.

Для описания диффузионных изменений dif^Y используется следующий метод [10].

Рассматривается диффузия (молекулярная или турбулентная) между соседними камерами, в каждой из которых в начальный момент времени субстанции Y распределена равномерно ($Y = U$). Камеры считаются изолированными от окружающего пространства.

Процесс изменения Y описывается одномерным уравнением диффузии:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial n} D \frac{\partial Y}{\partial n}, \; t \in [0, T], \; n \in [0, L_U + L_Y], \tag{4.56}$$

и вместе с граничными и начальными условиями:

$$Y(0,\, t) = U; \quad Y(L_U + L_Y,\, t) = Y; \quad Y(n,0) = Y_n = \begin{cases} U, & n \in [0, L_U]; \\ Y, & n \in [L_U, L_U + L_Y] \end{cases}$$

получается первая краевая задача математической физики.

Решение этой задачи дает распределение $Y(n, t)$ по оси n по времени t. Средние значения субстанции Y в каждый момент времени t найдем интегральным осреднением Рейнольдса (4.54). Очевидно, что скорость изменения средних $\overline{U}$, $\overline{Y}$ пропорциональна их разности. Следовательно, можно записать систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно $\overline{Y}$ и $\overline{U}$ вида:

$$\frac{d\overline{Y}}{dt} = \alpha_1 (\overline{U} - \overline{Y}) = dif^Y;$$

$$\frac{d\overline{U}}{dt} = \alpha_2 (\overline{Y} - \overline{U}) = dif^U, \tag{4.57}$$

где α_1, α_2 – коэффициенты, характеризующие интенсивность процесса диффузии, которые подлежат определению. Они являются функциями коэффициента диффузии и размеров рассматриваемых объемов (в модели-камер) вдоль нормали к площадке, через которую происходит диффузия.

Имеется еще один вид переноса вещества – опускание под действием силы тяжести тяжелых частиц: капель воды, пыли и т.п. Изменение водности и концентрации тяжелых примесей за счет опускания может быть описано уравнениями типа (4.54):

$$R^{\delta} = -\frac{1}{\rho L}\left(\rho\delta\overline{V_{\delta}} - \rho_U \delta_U \overline{V_{\delta U}}\right); \tag{4.58}$$

$$R^{c^T} = -\frac{1}{\rho L}\left(\rho c^T \overline{V_c} - \rho_U \delta_U \overline{V_{cU}}\right), \tag{4.59}$$

где $\overline{V_{\delta}}$, $\overline{V_{\delta U}}$, $\overline{V_c}$, $\overline{V_{cU}}$ – средние скорости опускания соответствующих субстанции в рассматриваемой и соседних камерах; ρ_U, δ_U – плотность и водность соседней по вертикали камере, из которой происходит опускание.

Коротковолновые и длинноволновые потоки радиации, проходящие через k-й слой атмосферы, описываются по элементарной схеме, предложенных для упрощенных расчетов [390]. Атмосфера представляется в виде N однородных слоев. Каждый k-й слой характеризуется коэффициентами отражения, поглощения и пропускания коротковолновой радиации r_k, a_k, h_k, коэффициентами пропускания и излучения (поглощения) длинноволновой радиации p_k, e_k, причем:

$$r_k + a_k + h_k = 1, \quad p_k + e_k = 1. \tag{4.60}$$

Количество слоев N совпадает с количеством воздушных камер одной ячейки. При необходимости можно выделить дополнительные слои внутри камеры.

Нисходящий и восходящий коротковолновые потоки $J_k^{\downarrow}$, $J_k^{\uparrow}$ описываются уравнениями:

$$J_k^{\downarrow} = h_k J_{k-1}^{\downarrow} + r_k J_k^{\uparrow}, \quad k = \overline{1,N};$$

$$J_k^{\uparrow} = r_{k+1} J_k^{\downarrow} + h_{k+1} J_{k+1}^{\uparrow}, \quad k = \overline{0,N}, \tag{4.61}$$

где $J_0^{\downarrow}$ – поток солнечной радиации на верхней границе атмосферы (считается известным); $J_0^{\uparrow}$ – поток, уходящей за пределы атмосферы радиации; $r_{N+1} = r_{\text{п}}$ – альбедо подстилающей поверхности; $h_{N+1} = 0$.

Для потока длинноволновой радиации, с учетом того, что каждый слой атмосферы излучает тепловую энергию, получаются уравнения:

$$G_k = p_k G_{k-1} + B_k e_k, \quad k = \overline{1,N};$$

$$U_k = p_{k+1} U_{k+1} + B_{k+1} e_{k+1}, \quad k = \overline{0,N}, \tag{4.62}$$

где $G_0 = 0$; $U_{N+1} = G_N$, B_k – интегральная интенсивность излучения абсолютно черного тела:

$$B_k = \sigma T_k^4, \tag{4.63}$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана.

В данной схеме переноса лучистой энергии, коэффициенты r_k, a_k, h_k, p_k, e_k в дальнейшем необходимо определить через компоненты атмосферы, изменяющие потоки радиации путем излучения, поглощения и рассеяния.

4.3. Численные схемы блочной модели переноса вредных примесей в бароклинной атмосфере

Записав уравнения гидродинамики турбулентной атмосферы и диффузии примесей (4.39)–(4.50) для каждого блока модели с учетом взаимодействия между блоками и присоединив к ним уравнения переноса радиации, получим систему уравнений блочной модели локального климата:

$$\frac{du}{dt} = \alpha_1 (U_1 - u) + \alpha_2 (U_2 - u) + lv + \frac{1}{L}(U_3 - u\bar{V}), \quad (i = 1, 2, 3);$$

$$\frac{dv}{dt} = \alpha_1 (U_4 - v) + \alpha_2 (U_5 - v) + lu + \frac{1}{L}(U_6 - v\bar{V}), \quad (i = 1, 2, 3);$$

$$\frac{dw}{dt} = \alpha_1 (U_7 - w) + \alpha_2 (U_8 - w) + \frac{1}{L}(U_9 - w\bar{V}) - g, \quad (i = 1, 2, 3); \tag{4.64}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{c_p \rho}(U_{10} - G_m) + \alpha_1 (U_{11} - \theta) + \alpha_2 (U_{12} - \theta) + \frac{1}{L}(U_{13} - \theta\bar{V}) + U_{14}, \quad (i = 1, 2, 3);$$

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{m}{\rho} + \alpha_1 (U_{15} - q) + \alpha_2 (U_{16} - q) + \frac{1}{L}(U_{17} - q\bar{V}) + U_{18}, \quad (i = 1, 2, 3);$$

$$\frac{d\delta}{dt} = m + \frac{1}{L}\left(U_{19} - \delta\overline{V}\right) + U_{20} - \frac{1}{L}\left(\delta\overline{V}_{\delta} - U_{21}\right) + \alpha_1\left(U_{22} - \delta\right) + \alpha_2\left(U_{23} - \delta\right), \quad (i = 1, 2, 3);$$

$$\frac{dc^T}{dt} = \alpha_1\left(U_{24} - c^T\right) + \alpha_2\left(U_{25} - c^T\right) - \alpha_c^T c^T + \frac{1}{L}\left(U_{26} - c^T\overline{V}\right) - \frac{1}{L}\left(c^T\overline{V}_c - U_{27}\right) + U_{28}, \; (i = 1, 2, 3);$$

$$\frac{dc^{\Gamma}}{dt} = \alpha_1\left(U_{29} - c^{\Gamma}\right) + \alpha_2\left(U_{30} - c^{\Gamma}\right) - \alpha_c^{\Gamma} c^{\Gamma} + \frac{1}{L}\left(U_{31} - c^{\Gamma}\overline{V}\right) + U_{32}, \quad (i = 1, 2, 3);$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{l_0 c^* \rho^*} U_{33} + \alpha_1\left(U_{34} - T\right) + \alpha_2\left(U_{35} - T\right) + G\alpha_1\left(U_{36} - q\right) + U_{37}, \quad (i = 0);$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{G}{c^* \rho^*}\overline{m_0} + \alpha_1\left(U_{38} - T\right) + \alpha_2\left(U_{39} - T\right), \quad (i = -1, -2);$$

$$\frac{dW_{\text{В}}}{dt} = -\frac{\overline{m_0}}{\rho^*} - \frac{J\Delta(\xi)}{\rho^*} + \alpha_1\left(U_{40} - W_{\text{В}}\right) + \alpha_2\left(U_{41} - W_{\text{В}}\right), \quad (i = -1, -2);$$

$$\frac{dW_{\text{П}}}{dt} = \frac{\overline{m_0}}{\rho^*} + \alpha_1\left(U_{42} - W_{\text{в}}\right) + \alpha_2\left(U_{43} - W_{\text{в}}\right), \quad (i = -1, -2);$$

$$\frac{d\left(W_{\text{П}} + W_{\text{В}}\right)}{dt} = \frac{1}{\rho^* l_0}\Big[J + G\alpha_1\left(U_{36} - q\right) + \alpha_1\left(U_{44} - \delta\right) + U_{45} + \alpha_2\left(U_{41} - W_{\text{в}}\right) + \alpha_2\left(U_{33} - W_{\text{п}}\right)\Big], \quad (i = 0).$$

Скорость фазовых переходов влаги m в случае термодинамического процесса в воздухе, насыщенном водяным паром, определяется формулой:

$$m = -\frac{dq_{\text{НАС}}}{dt} + \frac{q_{\text{НАС}}}{\theta}\frac{d\theta}{dt},$$

где $q_{\text{НАС}} = \dfrac{0{,}622\,E_{\text{НАС}}}{p_A}$; $E_{\text{НАС}} = 6{,}1 \cdot 10^{\frac{7{,}45\,(T-273)}{T-38}}$; $\overline{V}$ – скорость ветра; $U_1 = u_{i+1j}$; $U_2 = u_{i-1j}$; $U_3 = u_{ij-1}\overline{V_{ij-1}}$; $U_4 = v_{i+1j}$; $U_5 = v_{i-1j}$; $U_6 = v_{ij-1}\overline{V_{ij-1}}$; $U_7 = w_{i+1j}$; $U_8 = w_{i-1j}$; $U_9 = w_{ij-1}\overline{V_{ij-1}}$; $U_{10} = \varepsilon_{\pi ij}$; $U_{11} = \theta_{i+1j}$; $U_{12} = \theta_{i-1j}$; $U_{13} = \theta_{ij-1}\overline{V_{ij-1}}$; $U_{14} = \Delta\theta_{ij}$; $U_{15} = q_{i+1j}$; $U_{16} = q_{i-1j}$; $U_{17} = q_{ij-1}\overline{V_{ij-1}}$; $U_{18} = \Delta q_{ij}$; $U_{19} = \delta_{ij-1}\overline{V_{ij-1}}$; $U_{20} = \Delta\delta_{ij}$; $U_{21} = \delta_{i+1j}\overline{V_{i+1j}}\,\rho_{i+1j}/\rho_{ij}$; $U_{22} = \delta_{i+1j}$; $U_{23} = \delta_{i-1j}$; $U_{24} = c^T_{i+1j}$; $U_{25} = c^T_{i-1j}$; $U_{26} = c^T_{ij-1}\overline{V_{ij-1}}$; $U_{27} = c^T_{i+1j}\overline{V_{i+1j}}\,\rho_{i+1j}/\rho_{ij}$; $U_{28} = \Delta c^T_{ij}$; $U_{29} = c^{\Gamma}_{i+1j}$; $U_{30} = c^{\Gamma}_{i-1j}$; $U_{31} = c^{\Gamma}_{ij-1}\overline{V_{ij-1}}$; $U_{32} = \Delta c^{\Gamma}_{ij}$; $U_{33} = \varepsilon_{\pi 0j}$; $U_{34} = T_{1j}$; $U_{35} = T_{-1j}$; $U_{36} = q_{1j}$; $U_{37} = \Delta T_{0j}$; $U_{38} = T_{i+1j}$; $U_{39} = T_{i-1j}$; $U_{40} = W_{\text{В}\,i+1j}$; $U_{41} = W_{\text{В}\,i-1j}$; $U_{42} = W_{\text{П}\,i+1j}$; $U_{43} = W_{\text{П}\,i-1j}$; $U_{44} = \delta_{1j}$; $U_{45} = \Delta W_{\text{В}\,0j}$,

где $\Delta\theta_{ij}$, Δq_{ij}, $\Delta\delta_{ij}$, Δc^T_{ij}, Δc^{Γ}_{ij}, ΔT_{0j}, $\Delta W_{\text{В}\,0j}$ – антропогенные добавки в слои модели; i – номер блока по вертикали; j – номер блока по горизонтали; $i - 1$ – номер

соседнего блока снизу; $i + 1$ – номер соседнего блока сверху; $j - 1$ – номер блока, из которого дует ветер; $j + 1$ – номер следующего блока по воздушному потоку, $\varepsilon_\pi = \dfrac{d\Phi}{az}$; $\Phi = J\downarrow - J\uparrow - U + G$.

Следовательно, в предлагаемой блочной модели локального климата довольно просто с математической точки зрения записана основная система уравнений, но вследствие схематизации процессов появились дополнительные коэффициенты, при поиске которых максимально используются известные физические закономерности и выражающие теоретические, полуэмпирические и эмпирические формулы. От определения этих коэффициентов во многом будет зависеть степень приближения модели к действительности.

Определим коэффициенты двух блоков («Диффузия» и «Радиация») первого варианта модели. Расчетные модели для α_1, α_2 определяются непосредственно из системы уравнения:

$$\frac{d\overline{Y}}{dt} = \alpha_1\left(\overline{U} - \overline{Y}\right) = dif^Y;$$

$$\frac{d\overline{U}}{dt} = \alpha_2\left(\overline{Y} - \overline{U}\right) = dif^U,$$

фиксируя время $t = \overline{t}$ [7]:

$$\alpha_{1,2} = -\frac{\overline{Y}(\overline{t}) - \overline{Y}(t_0)}{U(t_0) - U(\overline{t}) + \overline{Y}(\overline{t}) - \overline{Y}(t_0)} \cdot \frac{1}{\overline{t} - t_0} \ln \frac{U(\overline{t}) - \overline{Y}(\overline{t})}{U(t_0) - \overline{Y}(t_0)}.$$

Для определения $\overline{Y}(t)$ привлечется непрерывная модель диффузии.

Параметры r_k, a_k, h_k, p_k, e_k для чистой влажной атмосферы можно рассчитать с помощью следующих формул полученных [8]:

$$h_k = \frac{H_k(1-b) + b - A_k}{H_{k-1}(1-b) + b - A_{k-1}}; \quad a_k = \frac{A_k - A_{k-1}}{H_{k-1} - A_{k-1}}; \quad e_k = 1 - \frac{1}{4}\sum_{j=1}^{4} \exp\left(-\beta_j W_{k,k+1}\right),$$

где $H_k = \dfrac{s_k}{s_0} - 1{,}041 - 0{,}160 \cdot \sqrt{M\left(0{,}949 p_{A_k}/p_0 + 0{,}051\right)}$; $A_k = 0{,}172 (MW_{k\infty})^{0{,}303}$; $b = \dfrac{1}{2}$,

где s_0 – поток прямой радиации на верхней границе атмосферы (солнечная постоянная); s_k – поток прямой радиации на уровне с давлением; p_{Ak}, p_0 – давление у поверхности земли; $M = f(h_0)$ – число оптических масс атмосферы, где h_0 – высота Солнца; A_k – функция поглощения прямой солнечной радиации водяным паром; $W_{k\infty}$ – содержание водяного пара в столбе единичного сечения с основаниями k, ∞ (в г/см^2):

$$W_{k\infty} = \frac{1}{g}\int_0^{p_A} q dp_A \approx \frac{1}{g}\sum_{i=1}^{N} q_k \Delta p_A,$$

где e_k – функция поглощения длинноволнового излучения водяным паром; $W_{k,h+1}$ – содержания водяного пара в столбе единичного сечения с основаниями k, $k + 1$; $\beta_1 = 0{,}166$; $\beta_2 = 2{,}60$; $\beta_3 = 36{,}2$; $\beta_4 = 114$.

Моделировался суточный ход температуры в одной ячейке модели в летний, безоблачный, безветренный день для широты 55,7° и склонения Солнца 23,4°. Поверхность считалась достаточно увлажненной ($q_0 = q_{\text{НАС}}(T_0)$ с коэффициентом отражения (альбедо) $r = 0{,}2$. Твердые и газообразные примеси не учитывались. Задавалось начальное состояние: $T_{-1} = 287$; $T_0 = 283$; $\theta_1 = 285$; $\theta_2 = 282$; $\theta_3 = 260$; $q_1 = 0{,}0054$; $q_2 = 0{,}0042$; $q_3 = 0{,}0014$.

Система уравнений (4.64) интегрировалась методом Рунге-Кутта с шагом по времени $t = 1$ ч. Результаты расчетов сравнивались с данными экспедиционных наблюдений.

4.4. Вычислительный эксперимент и его результаты

4.4.1. Метеорологические условия и состояние загрязнения

Важной задачей в проблеме охраны окружающей среды является обеспечение чистоты атмосферы. Накопление вредных примесей в приземном слое воздуха во многом зависит от метеорологических факторов, главным образом от устойчивости стратификации температуры воздуха и горизонтального переноса.

При застойных явлениях в атмосфере резко ослаблено перемешивание загрязненного воздуха и практически отсутствует горизонтальный перенос. Длительное сохранение слабых ветров над большой территорией способствует накоплению здесь вредных примесей, выбрасываемых промышленными предприятиями и автотранспортом.

При наличии в нижних слоях атмосферы задерживающих слоев, препятствующих турбулентному обмену, загрязнение приземных слоев воздуха возрастает. Особенно опасны случаи, когда нижняя граница приподнятой инверсии располагается невысоко над источником выброса. В зависимости от уровня развития промышленности города, его физико-географического положения и особенностей рельефа метеорологические условия могут оказывать неодинаковое воздействие на загрязнение воздуха. Целесообразно выделить наиболее общие и важные метеорологические предикторы, характеризующие условия, способствующие накоплению или рассеянию вредных примесей в атмосфере. К ним следует отнести:

– общее развитие синоптических процессов как меру способности проветривания и преобразования выбрасываемых в атмосферу веществ в различных погодных условиях (циркуляционный фактор);

– толщину слоя перемешивания воздуха, характеризующую термическую и динамическую турбулентность (вертикальное перемешивание);

– среднюю скорость ветра в слое перемешивания, а при отсутствии этого слоя – скорость ветра у поверхности земли как фактор интенсивности смены воздушных масс.

● Эти предикторы могут быть определены по исходным данным или предсказаны на 12, 24, 36 ч на основе использования фактического или прогностического аэросиноптического материала, имеющегося у синоптика при составлении краткосрочного прогноза погоды.

4.4.2. Зависимость загрязнения от метеорологических условий

Метеорологические условия – состояние атмосферы в некоторый момент или промежуток времени, обусловленные физическими процессами, происходящими в ней, и характеризуемые определенным сочетанием метеорологических элементов. Последнее зависит от типа синоптической ситуации. Он определяет общие условия циркуляции атмосферы. При малоактивном развитии процессов и застойных явлениях в атмосфере (слабый ветер) складываются наиболее неблагоприятные метеорологические условия, способствующие накоплению вредных примесей. Напротив, если атмосферные процессы активны, то приземные слои воздуха быстро очищаются. Тип синоптической ситуации определяется по картам будущего приземного поля давления заблаговременностью 24 или 36 ч или же по фактической приземной карте.

Важным условием загрязнения атмосферы является перераспределение вредных примесей по вертикали, которое происходит в слое перемешивания под влиянием термодинамической турбулентности. Чем тоньше такой слой, тем в большем количестве в нем будут накапливаться эти примеси.

Толщина слоя перемешивания (H_{TD}) в м или гПА рассчитывается по аэрологическим диаграммам. Верхняя его граница определяется как высота точки пересечения кривой стратификации с кривой состояния. За нижнюю границу слоя перемешивания принимается поверхность земли (если H_{TD} выражено в гПА, то берется давление, не приведенное к уровню моря).

На текущий день толщина слоя перемешивания определяется по аэрологической диаграмме за утренний срок с учетом ожидаемой максимальной температуры воздуха. Хорошие результаты при расчетах H_{TD} дает учет возможного суточного хода температуры у поверхности земли и на высотах. При этом устанавливается, в какой момент начнет появляться (исчезать) слой перемешивания и как будет меняться его толщина. Рассеяние вредных примесей можно ожидать только при наличии мощного слоя перемешивания, сохраняющегося большую часть дня.

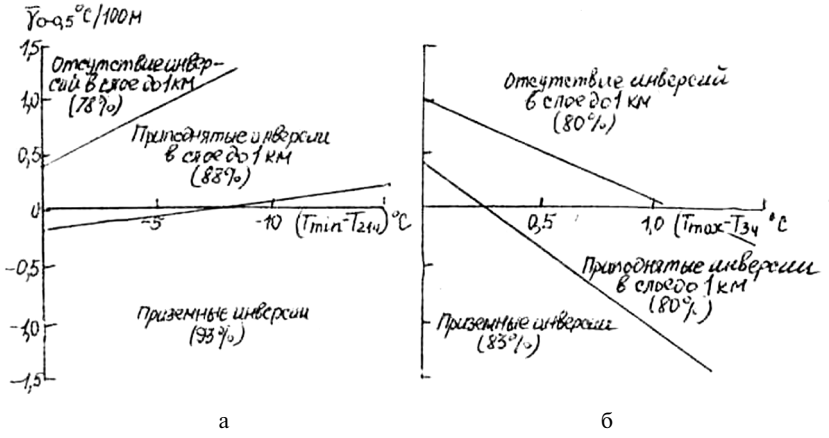
В тех случаях, когда на аэрологической диаграмме отмечается безразличная стратификация атмосферы или кривая состояния проходит не более чем на 1 °С левее кривой стратификации, верхняя граница слоя перемешивания находится на той высоте, на которой эти условия нарушаются.

Расчет H_{TD} по прогностическим кривым стратификации на 24 и 36 ч аналогичен расчетам на текущий день, но появляется необходимость учета изменений температуры, вызванных трансформацией, вертикальными движениями и вертикальными сдвигами ветра.

В ряде случаев нижнюю границу приподнятых инверсией можно отождествлять с верхней границей слоев перемешивания, а наличие приземных инверсий – с отсутствием слоев перемешивания.

Для уточнения прогноза на текущий день инверсий и базы инверсионного состояния нижнего слоя атмосферы можно рекомендовать эмпирические графики на рис. 11. Они отражают зависимость состояния нижнего слоя атмосферы до высоты 1 км от степени ночного выхолаживания или дневного прогрева воздуха у поверхности земли и от стратификации атмосферы в нижнем 500-метровом слое перед или в начале охлаждения или прогрева воздуха.

При уточнении прогноза на первую половину дня используется график на рис. 11, а. На оси абсцисс нанесены разности между прогнозируемой минимальной температурой воздуха на предшествующую этому дню ночь и фактической температурой в 21 ч этой же ночи. На оси ординат – средний вертикальный градиент температуры в 21 ч этой же ночи в слое 0–500 м. По значениям этих предикторов определяется ожидаемое состояние нижнего слоя атмосферы. При уточнении прогноза на вторую половину дня используется график на рис. 11, б. При этом предикторами являются разность между прогнозируемой максимальной температурой воздуха на день и фактической температурой воздуха в 3 ч предшествующей ночи ($T_{max} - T_3$) и средний вертикальный градиент температуры в слое 0–500 м в 3 ч ($\gamma = 0–0{,}5$). Если при прогнозе на первую половину дня ожидается понижение температуры вместо повышения, то следует пользоваться графиком для второй половины дня. Аналогично, если при прогнозе на вторую половину дня ожидается повышение температуры вместо понижения, то используется график для первой половины дня.



а б

Рис. 11. Графики для прогноза приземных, приподнятых инверсий ибезинверсионного состояния атмосферы в пограничном слое. Холодный период: а – первая половина суток; б – вторая половина суток

Уточнение прогнозов по указанным графикам составляются в случаях когда адвективное изменение температуры $\left|\left(\Delta T_a\right)\right| \le 3$ °C. При $\left|\left(\Delta T_a\right)\right| > 3$ °C за 12 ч или при скорости ветра более 8–10 м/с прогноз приземных инверсий по графикам не дается.

Средняя скорость ветра в слое перемешивания $\left(\overline{V}_{\text{ПЕР}}\right)$ рассчитывается по данным о прогнозе ветра заданной заблаговременности у поверхности земли и на поверхностях 925 и 850 гПА. При прогнозе на текущий день допустимо использование данных о фактической скорости ветра в исходный срок.

Если, судя по прогностической кривой стратификации, верхняя граница слоя перемешивания толщиной H_{TD} близка к изобарической поверхности 850 гПА, то $\overline{V}_{\text{ПЕР}}$ рассчитывается по формуле:

$$\overline{V}_{\text{ПЕР}} = \frac{V_3 + V_{925} + V_{850}}{3}. \tag{4.65}$$

Если же верхняя граница H_{TD} близка к поверхности 925 гПА, то вместо (4.65) используется формула:

$$\overline{V}_{\text{ПЕР}} = \frac{V_3 + V_{925}}{2}. \tag{4.66}$$

При $H_{TD} \sim 0$ принимается во внимание только прогностическое значение скорости ветра у поверхности земли (V_3).

Учитывая вышеизложенное в наиболее простом виде показатель метеорологических условий загрязнения (K_{MY3}) можно представить в виде суммы:

$$K_{MY3} = K_Z + K_M + K_{\overline{V}}, \tag{4.67}$$

где K_Z – тип синоптической ситуации; K_M – параметр, определяемый толщиной слоя перемешивания (H_{TD}); $K_{\overline{V}}$ – параметр, зависящий от средней скорости ветра в этом слое $\left(\overline{V}_{\text{ПЕР}}\right)$. Если слой перемешивания практически отсутствует, то вместо $\overline{V}_{\text{ПЕР}}$ рассматривается скорость ветра у поверхности земли (V_3).

4.4.3. Связь состояния загрязнения атмосферы от условий ее циркуляции

В предыдущем разделе показано, что зависимости между содержанием примеси над источником загрязнения и метеорологическими параметрами сложны и неоднозначны и что уровень концентраций определяется в основном комплексом параметров. Между тем синоптическая ситуация представляет собой в наиболее общем виде сложный комплекс метеорологических и аэрологических характеристик, отражает многообразие процессов, происходящих в атмосфере.

Синоптические ситуации, определяющие уровень загрязнения воздуха, успешно предсказываются существующими способами. Однако анализ синоптических условий загрязнения связан с определенными трудностями. Чаще всего они зависят от большой изменчивости синоптических процессов, а иногда их нечеткой выраженности. Поэтому для оценки загрязнения атмосферы на срок от 3 до 5 суток от объекта, находящегося в Западном Казахстане, целесообразно пользоваться типизацией синоптических процессов [1].

Можно выделить 5 типов синоптических процессов на изучаемой территории (табл. 37). Они мало чем отличаются от сезона к сезону. Чаще других в течение года (кроме лета) встречаются процессы четвертого типа (28,9–36,7 %). В это время высотная ложбина располагается над Восточной Европой. Над исследуемым районом располагается ПВФЗ, направленная с юго-запада на северо-восток (рис. 12, б). В соответствии с полем Н-500 у земной поверхности вдоль ПВФЗ происходит быстрое смещение барических образований, атмосферных фронтов и воздушных масс. При таких ситуациях, характеризующихся неустойчивостью процессов, высоких концентраций примесей в воздухе не наблюдается.

Летом максимальную повторяемость (29 %) имеют процессы первого типа (табл. 37), который является самым благоприятным для режима загрязнения. В это время в атмосфере (рис. 13, а) над востоком Европейской территории России и Уралом располагается высотный гребень с областью повышенного давления. Наибольший уровень концентраций примесей в приземном слое атмосферы отмечается в стационарных антициклонах и в малоподвижных гребнях, которые являются высокими и теплыми барическими образованиями. Анализ показал, что основная часть стационарных антициклонических образований, определяющих высокий уровень загрязнения воздуха, связан с отрогом сибирского максимума.

Таблица 37

Повторяемость типов синоптических процессов (%)

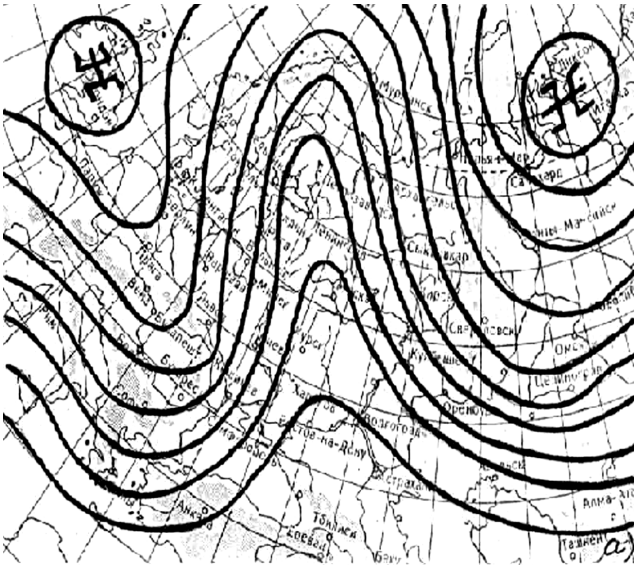
	Зима	Весна	Лето	Осень
I	18,2	16,8	29	16
II	15,1	14,0	–	5
III	15,1	16,8	24	26
IV	28,9	36,7	20	35
V	22,7	15,7	27	18

Таким образом, можно говорить об установлении синоптического макропроцесса, определяющего интенсивное скопление примесей в нижнем слое атмосферы. Это позволяет оценивать опасность ситуации с заблаговременностью в несколько дней.

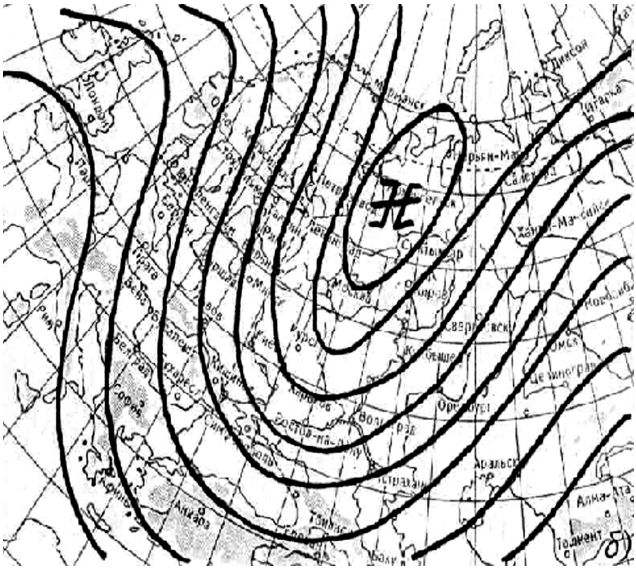
Наибольшее скопление примесей имеет место в антициклонах, которым соответствует область тепла в тропосфере. Холодные антициклоны менее опасны в связи с их быстрым перемещением. Наряду с этим уровень загрязнения воздуха в антициклоне определяется приземной температурой воздуха.

Если ситуация малоподвижного антициклона задана, то загрязнение воздуха должно быть тем больше, чем выше температура. С этим связано то обстоятельство, что содержание примесей в воздухе наиболее значительно в теплых частях антициклона, обычно на его северной и западной периферии.

Самую минимальную повторяемость в исследуемом районе имеют синоптические процессы второго типа (от 5 до 15,1 %). Высотное поле над исследуемым районом характеризуется высотной ложбиной или областью пониженного давления (рис. 13, б). В соответствии с полем H-500 у поверхности земли с запада на северо-восток происходит смещение циклонических образований. При циклонической ситуации воздух сравнительно чист, несмотря на то, что циркуляция воздуха в атмосфере вокруг центра направлена против часовой стрелки внутрь циклона по барическому градиенту и растекания его на окружающие районы не происходит. Это связано, очевидно, с осадками, усилением ветра и турбулентности.

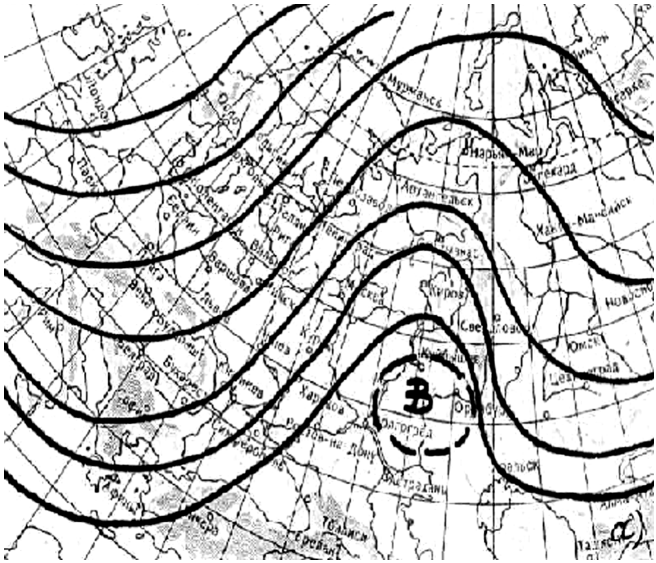


а

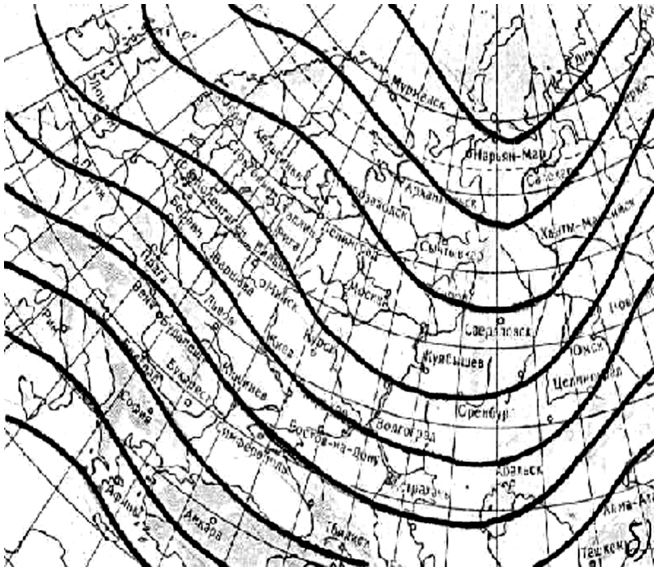


б

Рис. 12. Поле H500 3-го(а) и 4-го(б) типа синоптических процессов



а



б

Рис. 13. Поле H500 1-го(а) и 2-го(б) типа синоптических процессов

● Процессы третьего и пятого типов имеют почти одинаковую повторяемость (15,1–27%). ПВФЗ располагается в большинстве случаев над Западным Казахстаном. В третьем типе она направлена с северо-запада на юго-восток (рис. 13, а). Пятый тип синоптических процессов над исследуемым районом характеризуется зональным состоянием циркуляции. Последнее почти однозначно определяет районы возникновения и направления перемещения циклонов и антициклонов над рассматриваемой территорией. Данный тип отличается наибольшей скоростью движения синоптических объектов. Во все сезоны, кроме осени, в большинстве случаев погоду в исследуемом районе формируют смещающиеся в восточном направлении антициклоны и гребни повышенного давления. Однако, из-за значительной скорости смещения, они не определяют высокого уровня загрязнения воздуха.

Для исследуемой территории наиболее опасными являются синоптические процессы первого типа. Они способствуют созданию повышенного уровня концентрации примесей в воздухе. При осуществлении этого типа возникают синоптические условия, определяющие формирование высоких уровней загрязнения, которые представляют повышенную опасность для здоровья людей и окружающей среды. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о больших возможностях использования синоптического анализа для прогнозирования загрязнения атмосферы на срок до 5 дней.

5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСАХ В НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТОДОБЫВАЮЩИХ РЕГИОНАХ

В данном разделе моделированы распространения вредных выбросов при аварийных выбросах в нефтегазоконденсатодобывающих регионах. Составлена программа вычисления и проведен расчет на вычислительной машине. Приведена функциональная блок-схема программы. Определена математическая постановка и алгоритм решения задачи прогнозирования распространения сероводорода при аварийных выбросах в атмосферу, выбрана подходящая математическая модель процесса распространения и определен общий алгоритм решения задачи. Описанный процесс доведен до программной реализации. Выбран полуэмпирический подход для прогнозирования перемещения зон экстремально высокого загрязнения воздуха сильно действующими ядовитыми веществами (СДЯВ).

Выведена модель расчета концентрации от нестационарного непрерывного источника при аварийном выбросе. Изложены три возможных подхода к решению задачи динамического прогноза. Анализ возможности использования методов численного моделирования показывает, что полуэмпирический подход имеет наиболее развитую теоретическую базу и в принципе позволяет учитывать практически все основные факторы, влияющие на процессы рассеяния СДЯВ.

Детально анализирована комбинированная модель, которая является наиболее общей, в частности, она использует более сложные характеристики метеоситуации.

Созданы системы уравнения для прогноза динамики распространения опасного уровня концентрации сероводорода при аварийных выбросах и получены следующие выводы:

а) ввиду многофазности потока в шлейфах и отсутствия достаточно адекватных математических моделей для таких потоков представляется проблематичным перекачиваемой смеси такой системы контроля шлейфов, в которой были бы обеспечены требуемая надежность, точность, оперативность обнаружения порывов;

б) акустические свойства трубопроводов (но не перекачиваемой смеси) могут быть положены в основу методики обнаружения порывов в шлейфах;

в) в системе контроля магистральных трубопроводов, в которых поток близок к однофазному, можно использовать как акустические характеристики труб, так и гидро-газо-динамические свойства потока;

г) на особо опасных направлениях может быть использована подсистема нейтрализации сероводородного облака;

д) методика решения задачи прогноза является самой простой и удобной в использовании. Одновременно с этим она является и самой грубой. Но это

будет вызывать не игнорирование опасных уровней загрязнения, а скорее некоторую перестраховку в расчетах, что в нашей ситуации вполне приемлемо. Преимуществом этой методики относительно комбинированной модели является и то, что она позволяет учитывать намерения метеоситуации в процессе рассеивания сероводородного облака;

е) значения метеорологических параметров, необходимые в методике, определяются по данным ближайшей репрезентативной метеостанции или специально организованного поста наблюдений. Скорость и направление ветра измеряются на высоте флюгера (10 м) с осреднением не менее 5 мин;

ж) для КНГКМ рекомендуется методика решения прогнозной задачи;

з) адаптацию модели прогноза целесообразно провести в 2 этапа: первый этап – машинная адаптация и второй – на объектах.

Моделированы аварийные выбросы с использованием струйной модели. Проведены модельные расчеты характеристик и анализ исходных данных параметров струи, истекающей из буровой скважины при аварии. Определены параметры струи, истекающей из буровой скважины при аварии.

5.1. Анализ исходных данных параметров струи, истекающей из буровой скважины при аварии

Анализ представленных исходных данных перечня и характеристик источников загрязнения атмосферы региона КНГКМ позволяет их распределить на три группы [385, 388, 705, 406]:

I. Высокотемпературные (T от 200 до ~1400,0 °С). Из них температуру 200,0 °С имеют 7 источников (№ 68, 70, 72, 74, 78 и 80). Температура выбросов 1242,0 °С зафиксирована у источника № 5 и 1417,0 °С – у источника № 6. Для всех других высокотемпературных источников (37 источников) она составляет 350,0 °С. Для подавляющего большинства высокотемпературных источников (32 источника) основными вредными выбросами являются следующие вещества: NO_2, CO, SO_2 и NO и лишь в выбросах восьми источников (№ 67, 69, 71, 73, 75, 77, 79, 81) вместо SO_2, содержатся углеводы (C_nH_m).

II. Низкотемпературные источники (T – 20,0–28,0 °С), содержащие в выбросах только H_2S и C_nH_m.

III. Низкотемпературные источники, содержащие помимо них меркаптаны

Особняком стоит источник № 81, который в своих выбросах помимо упомянутых соединений содержит сажу. Для оценки степени вредности и токсичности веществ используются следующие показатели: ПДК, $ПДК_{р.з}$, $ПДК_{с.с}$, $ПДК_{в}$, $ПДК_{м.р}$, ЛК50. Где ПДК – предельно допустимая концентрация вредного вещества в воздухе рабочей зоны, атмосферном воздухе или воде водоемов и рек; $ПДК_{р.з}$ – предельно допустимая концентрация вредного вещества в воздухе рабочей зоны, мг/м^3; $ПДК_{с.с}$ – среднесуточная предельно-допустимая концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест, мг/м^3; $ПДК_{в}$ – предельно допустимая концентрация вредного вещества в сточных водах, мг/л; $ПДК_{м.р}$ – максимальная разовая концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест, мг/м^3; ЛК50 – летальная концентрация вредного вещества, вызывающая при вдыхании

гибель 50 % подопытных животных, мг/л. в табл. 38 приведены значения ПДК для газообразных веществ, содержащихся в выбросах источников КНГКМ.

Углерод (газовая сажа) имеет $ПДК_{р.з} = 3,5$; $ПДК_{с.с} = 0,05$; $ПДК_{м.р} = 0,15$ мг/м^3. По силе вредного воздействия вещества разделяют на 4 класса (категории) опасности: I – чрезвычайно опасное вещество; II – высокоопасное вещество; III – умеренно опасное; IV – малоопасное.

В табл. 39 приведены категории опасности рассматриваемых нами веществ и их токсичность.

Таблица 38

ПДК для газообразных веществ, содержащихся в выбросах источников КНГКМ

№ п/п	Вещество	Формула	$ПДК_{р.з}$, мг/м^3	$ПДК_{м.р}$, мг/м^3	$ПДК_{с.с}$, мг/м^3
1.	Сероводород	H_2S	10	0,008	0,008
2.	Докись серы	SO_2	10	0,5	0,05
3.	Окись углерода	CO	20	3	1
4.	Окись азота	NO	5	0,4	0,06
5.	Двуокись азота	NO_2	2	0,08	0,04
6.	Углеводороды	C_1–C_{10}	300	300	300
7.	Метилмеркаптан	CH_3SH	0,8	0,8	0,8

Из анализа физико-химических и токсических свойств вредных веществ, выбрасываемых источниками КНГКМ, можно заключить, что наибольшую опасность представляют сероводород, окислы азота и серы. Сероводород имеет низкое значение ПДК, высокую категорию опасности, кроме того, он тяжелее воздуха и сосредоточивается вблизи поверхности. Окислы же азота и серы хорошо растворяются в воде с образованием азотной, азотистой и сернистой кислот, что влечет за собой выпадение кислотных дождей. Это может оказать пагубное влияние на растительность и живые организмы, обитаемые в близлежащих водоемах и реках.

Вредные выбросы в атмосферу, которые чаще всего тяжелее воздуха, оседают в дальнейшем на почве и частично с поверхностными стоками также поступают в водоемы, дополняя вредное действие кислотных дождей. Загрязнение воздуха снижает прозрачность атмосферы, видимость, освещенность, повышает влажность воздуха, образует туманы, пыль, дым. На степень загрязнения оказывают влияние метеорологические факторы: температура воздуха, температурные инверсии, направление и скорость ветра, степень вертикального смещения и рассеивание выбросов. Наиболее неблагоприятные условия рассеивания бывают в зимний период, когда часто бывают штили. В атмосферный воздух исследуемого района поступают вредные вещества из различных источников, в выбросах каждого из которых содержится несколько компонентов.

Таблица 39

Категории опасности рассматриваемых веществ и их токсичность

№ п/п	Вещество	Формула	Категория опасности	Токсическое воздействие на организм
1.	Сероводород	H_2S	II	раздражающее и удушающее действие, паралич нервной системы, пневмония, неврозы
2.	Двуокись серы	SO_2	III	общетоксичное раздражающее действие (глаза, дыхательные пути, кроветворные органы, головная боль, одышка)
3.	Окись углерода	CO	IV	токсичное действие на клетки, нарушает тканевое дыхание и изменения потребления тканями кислорода
4.	Метилмеркаптан	CH_3SH	II	сильное отравляющее действие резкое падение работоспособности канцерогенное ЛК50 для крыс 1,2 м/л
5.	Окись азота	NO	III	при контакте с легкими приводит к образованию азотистой кислоты, отек легких, разрушение эритроцитов
6.	Двуокись азота	NO_2	III	в легких образуется азотная кислота, воспалительное изменение слизистых, отек легких
7.	Газовая сажа	C	III	заболеваемость дыхательных путей, пылевые бронхиты, туберкулез, канцерогенноопасна

При совместном присутствии в атмосферном воздухе нескольких веществ, обладающих суммацией действия, сумма их концентраций по приведенной ниже формуле, не должна превышать единицы:

$$\frac{C^1}{\text{ПДК}^1} + \frac{C^2}{\text{ПДК}^2} + \frac{C^n}{\text{ПДК}^n} < 1,$$

где C^1, C^2, C^n – фактические концентрации веществ в атмосфере; ПДК^1, ПДК^2, ПДК^n – предельно допустимые концентрации тех же веществ.

При комбинированном действии токсических веществ в выбросах источников КНГКМ надо учитывать, что большинство из них обладает суммацией действия, например, следующие соединения: окись углерода (CO) + двуокись азота NO_2, сернистый ангидрид (SO_2) + окись углерода (CO) и т.д.

Таким образом, если в выбросах оказываются вещества, обладающие эффектом суммации действия или однонаправленным действием, безопасность таких выбросов должна рассчитываться на ПДК во столько раз меньшая табличных, сколько таких веществ одновременно выбрасывается в атмосферу.

Все вышеизложенное необходимо в дальнейшем учитывать и использовать при расчетах экологической обстановки в регионе КНГКМ и разработке мер по ее оздоровлению. Например: $ПДК_{с.с}$ сероводорода составляет 0,008 мг/м^3, $ПДК_{с.с}$ двуокиси серы – 0,05 мг/м^3. С другой стороны наиболее инертные содержащиеся в выбросах углеводороды резко повышают свою токсичность при совместном выбросе с сероводородом, сжигая сероводород по схеме:

$$2H_2S + 3O_2 = 2H_2O + 2SO_2,$$

мы уменьшаем токсичность выбросов $ПДК_{SO} < ПДК_{HS}$ и устраняем активизирующее влияние H_2S на токсическое действие выбрасываемых вместе с ним углеводородов.

Поскольку H_2S и углеводороды при низких температурах друг с другом не реагируют, их концентрацию при развитии струй можно считать простым разбавлением. Концентрацию NO_2, CO, SO_2 и N*O* в высокотемпературных струях следует считать с учетом реакции:

$$SO_2 + 1/2O_2 = SO \text{ и } 2NO + O_2 = 2NO_2.$$

5.2. Определение параметров струи, истекающей из буровой скважины при аварии

В качестве исходных данных был взят расход газа $G_o = 500$ м^3/мин при заданном диаметре поперечного сечения $d = 20$ см. Предполагается, что все волновые процессы, сопровождающие начальную стадию истечения уже закончились, и процесс рассматривается в стадии струйного стационарного истечения. Ввиду неопределенности в исходных данных процентного состава и физико-химических свойств газоконденсатной смеси, в данной работе (на 1-м этапе) целесообразно было провести параметрические расчеты газодинамических полей течения в струе, соответствующих разным начальным условиям (табл. 40). Расчеты велись в рамках двумерных параболизированных стационарных уравнений Навье-Стока с применением явного маршевого численного метода [22]. Струя предполагалась осесимметричной, турбулентной, изобарической.

Физико-химические процессы учитывались аналогично работам [5].

Здесь *C* – мольные концентрации компонент истекающих газов.

Параметры атмосферы: состав – воздух; температура – $T = 293{,}0$ °K; давление атмосферы – $P_o = 10^5$ Па; скорость газа $V_o = 0$ м/с.

Во всех вариантах расчетов скорость истекающих из скважины газов принималась равной $V_c = 1060$ м/с.

В результате проведенных расчетов показано, что кинематические (скорость) и геометрические (вертикальные и горизонтальные) характеристики струи относительно слабо зависят от термодинамических и физико-химических свойств истекающей из скважины горючей смеси, от начальной

температуры, от состава смеси. Результаты расчетов показывают, что максимальная высота подъема истекающих из скважины газов и продуктов их горения составляет порядка $H = 200$ м. при этом максимальные горизонтальные размеры струи, содержащей продукты сгоревших газов, меньше 70 м. (Максимальная высота подъема определялась из условия, когда вертикальная скорость сгоревших газов в струе составляла ~0,2 %, от скорости газов на срезе скважины; последняя при заданном расходе составляла $V_c = 1060$ м/с).

Таблица 40

Исходные данные и обозначения расчетов струйного течения

Состав газа на срезе скважины	T_c – температура газа на срезе скважины
Воздух	293,0 °K
Воздух	700,0 °K
воздух	1000,0 °K
воздух	1300,0 °K
$C_{CO} = 0,2$	1300,0 °K
$C_{O2} = 0,2$	1300,0 °K
$C_{H2} = 0,6$	1300,0 °K
$C_{CO} = 0,2$	1300,0 °K
$C_{H2} = 0,8$	1300,0 °K

Выявлено также, что основные процессы горения и турбулентного перемещения истекающих из скважины газов с окружающей атмосферой происходят на начальным участке струи и их мольная доля падает на порядок на высотах $H < 20$ м. Условия распространения в атмосфере компонент смеси газов обусловлены турбулентной атмосферной диффузией, а также наличием ветра. Поскольку температура сформировавшегося облака продуктов горения может существенно отличаться от температуры окружающего воздуха, определенную роль в процессе переноса может играть термодиффузия. В рис. 14–23 приведены следующие результаты исследования: параметры струи; зависимость радиуса поперечного сечения струи от продольной координаты (высоты над скважиной); скорость газов и продуктов их сгорания на оси струи в зависимости от продольной координаты; температура истекающих газов (на оси струи) в зависимости от продольной координаты; температура газов и продуктов их сгорания (на оси струи) в зависимости от продольной координаты.

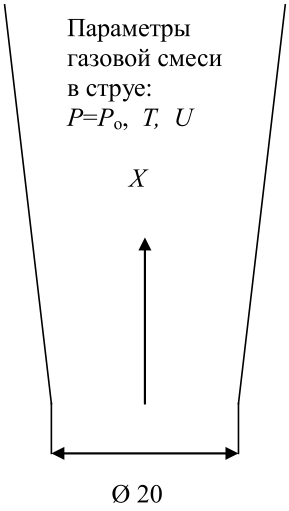


Рис. 14. Параметры струи при аварийном выбросе.
Параметры на срезе скважины: T_c, U_c, $P_c = P_o = 10^5$ Па.
Состав: C_i – мольные доли компонентов истекающей смеси газов

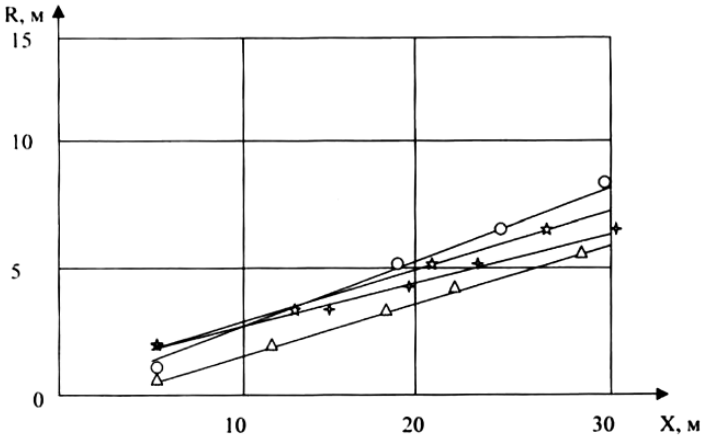


Рис. 15. Зависимость радиуса поперечного сечения струи
от продольной координаты (высоты над скважиной)

В дальнейшем целесообразно провести расчеты процесса истечения струи из скважины с учетом силы тяжести при конкретном процентном составе газоконденсатной смеси, которая поставляется заказчиком.

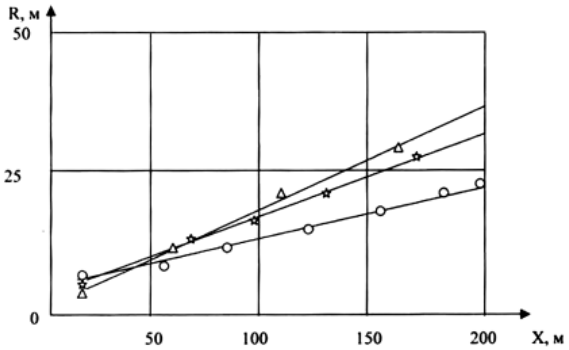


Рис. 16. Зависимость радиуса поперечного сечения струи от продольной координаты (высоты над скважиной)

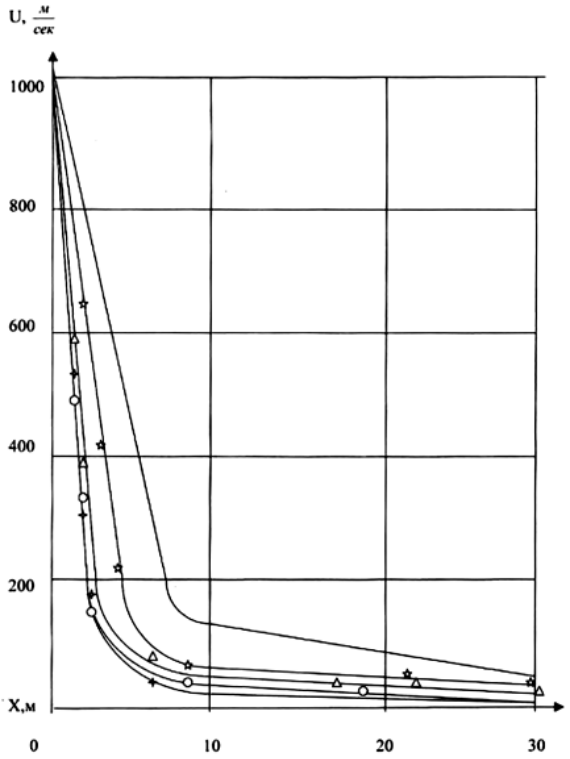


Рис. 17. Скорость газов и продуктов их сгорания на оси струи в зависимости от продольной координаты

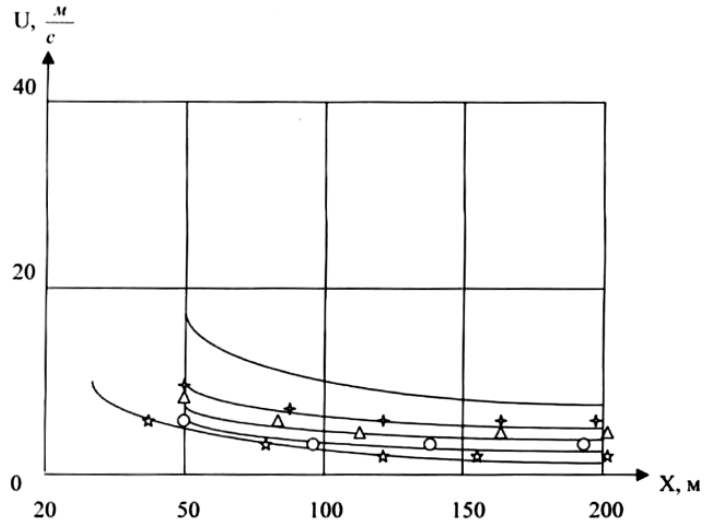


Рис. 18. Скорость газов и продуктов их сгорания
на оси струи в зависимости от продольной координаты

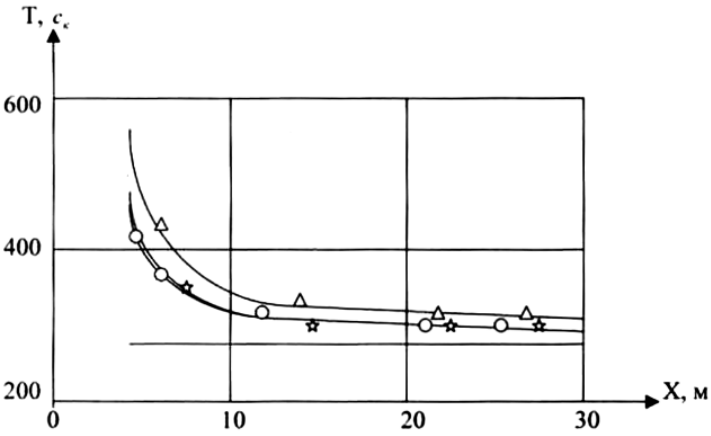


Рис. 19. Температура истекающих газов (на оси струи)
в зависимости от продольной координаты

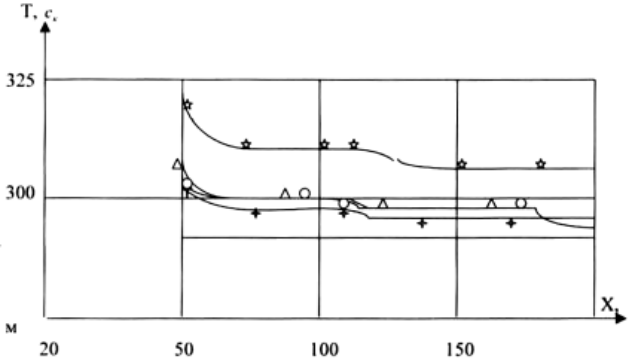


Рис. 20. Температура истекающих газов (на оси струи)
в зависимости от продольной координаты

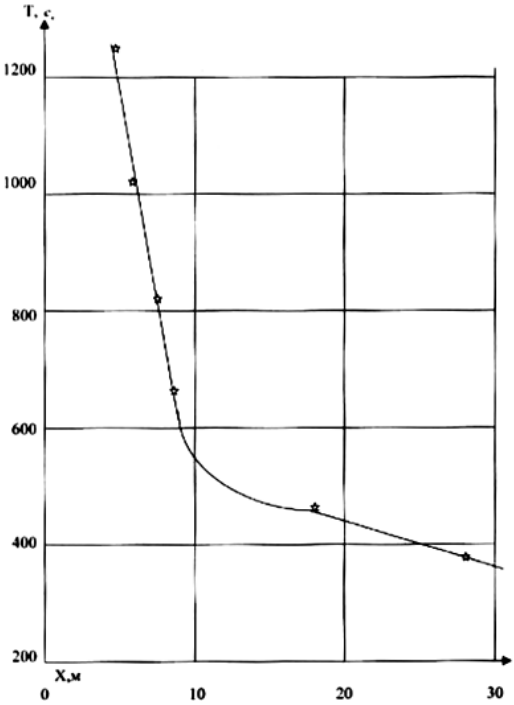


Рис. 21. Температура газов и продуктов их сгорания (на оси струи)
в зависимости от продольной координаты

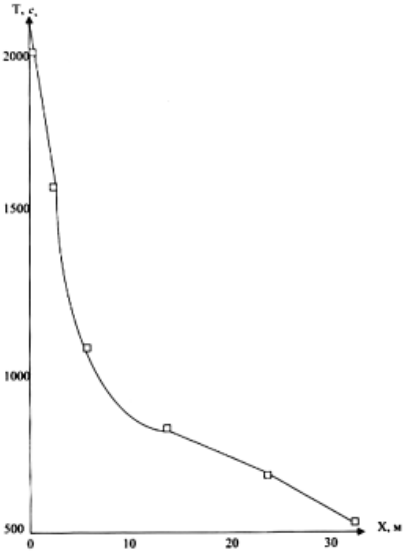


Рис. 22. Температура газов и продуктов их сгорания (на оси струи) в зависимости от продольной координаты

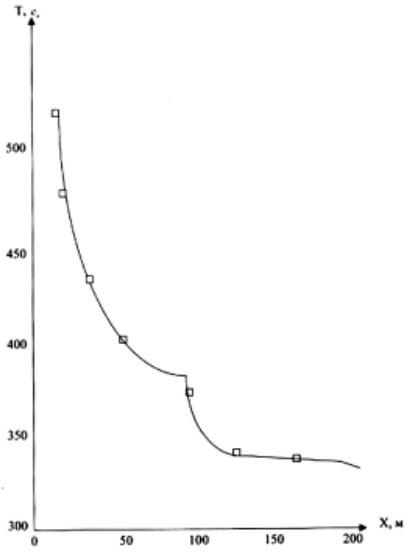


Рис. 23. Температура газов и продуктов их сгорания (на оси струи) в зависимости от продольной координаты

5.3. Процессы, определяющие перенос загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах

Распределение температуры в основном ответственно за степень перемешивания выброшенных веществ и высоты, до которой наблюдается перемешивание. В настоящее время большинство исследователей определяют верхнюю границу слоя перемешивания (высоту пограничного слоя атмосферы) по наличию задерживающих слоев инверсии (или изотермии). Однако известно, что загрязняющие вещества могут проникать через инверсионные слои и поэтому высоту слоя перемешивания следует либо определять по затуханию турбулентных потоков, либо задавать так, чтобы загрязняющие вещества заведомо не проникали за расчетную область. Измерения вертикальных профилей различных загрязняющих веществ показывают, что большинство из них сосредоточено в нижнем двухкилометровом слое атмосферы. В этой связи в модели в качестве верхней границы была выбрана высота 5 км, на которой никогда не наблюдалось значительных концентраций загрязняющих веществ, выброшенных наземными или приподнятыми источниками [413, 414, 416].

Степень перемешивания, которая зависит от устойчивости атмосферы параметризовалась через введение переменного по высоте профиля коэффициента турбулентной диффузии.

Вертикальный коэффициент турбулентности вычислялся по алгоритму, подробно изложенному во втором разделе.

Весь рассматриваемый слой атмосферы (до 5 км) был разделен на две области: приземной подслой и слой перемешивания.

В приземном подслое (до 100 м) коэффициент турбулентности оценивался по методу с выделением двух режимов турбулентности: устойчивой и неустойчивой стратификации, которая определялась по безразмерной высоте ξ:

$$\xi = \left(\frac{\chi z}{u_*}\right)^2 \frac{g}{T}\left(\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \gamma_a\right), \tag{5.1}$$

где χ – постоянная Кармана, равная 0,4; u_* – скорость динамического трения; γ_a – влажноадиабатический градиент температуры.

Выше приземного слоя, коэффициент турбулентности вычислялся по методу Блокадара. Его величина складывается из двух слагаемых: турбулентности на верхней границе приземного слоя ($K_z(h)$) и турбулентности K_e, определяемой стратификацией выше приземного слоя в зависимости от степени конвективной неустойчивости:

$$K_z(z) = K_z(h) \cdot \exp\left(-\beta \frac{z-h}{H}\right) + K_e; \tag{5.2}$$

$$K_e = \begin{cases} K_0\left(1 + \alpha\left(-\dfrac{g}{\theta}\dfrac{\Delta\theta}{K_0 v_0}\right)\right)^{1/3} \Delta z, & \dfrac{\partial\theta}{\partial z} < 0; \\ K_0, & \dfrac{\partial\theta}{\partial z} \geq 0, \end{cases}$$

где h – высота приземного подслоя; θ – потенциальная температура; K_0, v_0 – фоновые значения вихревой диффузии и вязкости, равные соответственно 0,3 и 0,63; α, β – эмпирические константы, равные соответственно 0,3 и 1,0.

При описании процессов адвективного переноса и турбулентного рассеяния выброса АС в атмосфере необходимо учитывать, что выбрасываемая газоаэрозольная смесь имеет определенную скорость, связанную как с ее начальной кинетической энергией, так и с действующими на нее силами плавучести, обусловленными разностью температур смеси и окружающего воздуха. Таким образом, в реальных условиях существует как бы эффективная высота трубы, которая больше ее реальной высоты на Δh. Известны различные подходы к определению Δh, в модели выбрано соотношение рекомендованное Главной Геофизической Обсерваторией (Россия):

$$\Delta h = 1{,}5\frac{wR}{U_\Phi}\left[2{,}5 + \frac{3{,}3gR\Delta T}{TU_\Phi^2}\right], \tag{5.3}$$

где w, ΔT – скорость и перегрев газо-аэрозольного выброса; U_Φ, T – скорость ветра и температура окружающего воздуха; R – радиус устья трубы.

Для полного описания распространения газо-аэрозольного выброса АС в атмосфере, необходимо учесть процессы вымывания, влажного выведения,

радиоактивного распада и трансформации химических и агрегатных состояний радионуклидов. Для учета всех этих процессов вводят поправки в виде экспоненциальных множителей с соответствующими постоянными λ_i ($i = 1, S$), которые выбираются эмпирически для каждого процесса и зависят от конкретных химических составов выброса и погодных условий.

Согласно первому подразделу третьего раздела, распространение загрязняющих веществ в атмосфере описывается трехмерным уравнением сохранения массы:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial (uq)}{\partial x} + \frac{\partial (vq)}{\partial y} + \frac{\partial \left((w + v_g) q \right)}{\partial z} = \\ = K_s \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_s \frac{\partial (uq)}{\partial x} \right) + iS, \tag{5.4}$$

где q – объемная концентрация примеси; u, v, w – компоненты скорости ветра, переменные в пространстве и времени; v_g – скорость гравитационного оседания; K_s, K_z – коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии; IS – поле источников (мгновенных или непрерывных) выбросов, являющиеся функцией пространства и времени.

Горизонтальные компоненты скорости ветра u, v – являлись входными параметрами модели и определялись из объективного анализа.

Вертикальный компонент скорости ветра w определялся из уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \tag{5.5}$$

Скорость гравитационного оседания описывалась законом Стокса и для частиц с радиусом $r \le 10$ мкм определялась:

$$v_g = 1{,}26 \cdot 10^{-5} \cdot \rho \cdot r^2, \tag{5.6}$$

где ρ – плотность загрязняющих веществ; r – радиус частиц.

Уравнение (5.4) решалось при следующих начальных и граничных условиях:

$$q(x, y, z, 0) = q_\Phi(x, y, z), \tag{5.7}$$

где $q_\Phi(x, y, z)$ – фоновое значение объемной концентрации примеси для первых суток расчета:

$$q(x, y, z, 0) = q_0(x, y, z), \tag{5.8}$$

где $q_0(x, y, z)$ – объемная концентрация примеси, сформировавшаяся за предшествующие сутки.

На верхней границы области (H = 5 км) задаются нулевая концентрация:

$$q(x, y, z, H) = 0 \tag{5.9}$$

На нижней границе (подстилающая поверхность) задаются условия полного поглощения на предшествующем шаге во времени и рассчитываются полный

(турбулентный и адвективный) поток примеси на подстилающую поверхность на расчетном шаге по времени:

$$q(x, y, 0, t - \Delta t) = 0; \tag{5.10}$$

$$\frac{\partial q(x, y, 0, t)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial q}{\partial z}\right) - \left(w + v_g\right)\frac{\partial q}{\partial z}.$$

Также рассматривается постановка граничных условий третьего рода:

$$K_z \frac{\partial q}{\partial z} - \beta q = 0, \tag{5.11}$$

где β – эмпирический константа, определяющий поглощение примеси подстилающей поверхности.

Условие (10) для тяжелых примесей с большей скоростью гравитационного оседания, для легких примесей условие (11). Кроме того, оно учитывает турбулентный подъем примеси, что позволяет рассматривать подстилающую поверхность как поле вторичных источников и рассчитывать вторичный перенос загрязнителя.

При задании граничных условий на боковых границах обычно пользуются условиями типа Дирихле (задано значение функции), или условиями типа Неймана (задан градиент функции по нормали к границе), или задается свободная граница:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + c_p h \frac{\partial q}{\partial n} = 0. \tag{5.12}$$

Последнее условие кажется наиболее физичным, но из-за не совсем строгого определения фазовой скорости ($c_p h$) было решено заменить ее реальной скоростью, причем для лучшего согласования значений функции на границе и внутри расчетной области, кроме оператора нормального к границе добавлялись операторы с касательными компонентами скорости. Таким образом, боковые граничные условия имели следующий вид:

– в области втока:

$$q = 0;$$

– в области вытекания:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial (uq)}{\partial x} - \frac{\partial (vq)}{\partial y} - \frac{\partial \left(\left(w + v_g\right)q\right)}{\partial z}. \tag{5.13}$$

Постановка боковых граничных условий и их конечно-разностная аппроксимация подробно исследованы в работе [22] и сделан вывод, что граничные условия [22] в области вытекания позволяют полностью избежать отражения на границе расчетной области.

Распространение примеси в условиях сложного рельефа и над ровной поверхностью будут существенно различаться из-за деформации потока препятствиями. При наличии рельефа система (5.4)–(5.13) должна решаться в области с криволинейной границей. Конкретная форма области, при условии жесткой горизонтальной стенки на высоте H будет определяться функцией, описывающей форму

рельефа $Z_S(x, y)$. Чтобы избежать трудностей, связанных с численными интегрированиями в криволинейной области, обычно переходят к новым координатам, в которых расчетная область становится прямолинейной. Было выбрано преобразование, детально описанное во втором разделе, удовлетворяющее следующим условиям: преобразование обратимо; идентично при $Z_S = 0$ и $Z_S = H$; имеет непрерывные вторые производные; сохраняет ошибку аппроксимации того же порядка, что и в декартовой системе координат, что достигается близостью к 1 его определителя.

Преобразование имеет вид:

$$\overline{X} = X;\ \overline{Y} = Y;\ \overline{Z} = \frac{H\left(Z - Z_S\right)}{H - Z_S}. \tag{5.14}$$

Уравнение неразрывности в новых координатах имеет вид:

$$\frac{1}{G}\frac{\partial}{\partial X_i}\left(G\overline{u_i}\right) = 0, \tag{5.15}$$

где $\overline{u_i}$ ($i = 1, 2, 3$) – новые компоненты скорости ветра; $G = (H - Z_S)/H$ – якобиан преобразования.

Новые компоненты скорости определяются матрицей перехода:

$$\begin{pmatrix} \overline{u} \\ \overline{v} \\ \overline{w} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \dfrac{\partial Z_S}{\partial x}A & \dfrac{\partial Z_S}{\partial y}A & \dfrac{1}{G} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}, \tag{5.16}$$

где $A = \dfrac{\overline{Z} - H}{H - Z_S}$.

Трехмерное уравнение сохранения массы в новой системе координат имеет вид:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial q}{\partial t} + \overline{u}\frac{\partial q}{\partial \overline{x}} + \overline{v}\frac{\partial q}{\partial \overline{y}} + \left(w + \upsilon_g\right)\frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial q}{\partial \overline{z}}A\left(\frac{\partial Z_S}{\partial \overline{x}} + \frac{\partial Z_S}{\partial \overline{y}}\right) = \frac{1}{G^2}\left(K_z\frac{\partial^2 q}{\partial \overline{z}^2} + \frac{\partial K_z}{\partial \overline{z}}\frac{\partial q}{\partial \overline{z}}\right) + \\ &+ K_S\left(\frac{\partial^2 q}{\partial \overline{x}^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial \overline{y}^2}\right) + K_S\frac{\partial q}{\partial \overline{z}}\left[A\left(\frac{\partial^2 Z_S}{\partial \overline{x}^2} + \frac{\partial^2 Z_S}{\partial \overline{y}^2}\right) + \frac{2A}{GH}\left(\left(\frac{\partial Z_S}{\partial \overline{x}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_S}{\partial \overline{y}}\right)^2\right)\right] + \\ &+ K_S 2A\left(\frac{\partial^2 q}{\partial \overline{x}\partial \overline{z}}\frac{\partial Z_S}{\partial \overline{x}} + \frac{\partial^2 q}{\partial \overline{y}\partial \overline{z}}\frac{\partial Z_S}{\partial \overline{y}}\right) + K_S\frac{\partial^2 q}{\partial \overline{z}^2}A^2\left(\left(\frac{\partial Z_S}{\partial \overline{x}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_S}{\partial \overline{y}}\right)^2\right) + IS. \end{aligned} \tag{5.17}$$

Граничные и начальные условия для решения этого уравнения выбираются такие же, как и для модели над однородной поверхностью.

В модели рассчитываются конвективные движения, вызванные неравномерностью нагрева подстилающей поверхности (температура водоема-охладителя) и неравномерностью температуры в приземном слое (остров тепла над водоемом-охладителем):

$$w_{conv} = \left(\alpha\left|\frac{g\left(T_B - \overline{T_B}\right)}{T_B}\right|\Delta Z\right)^{1/2};\quad T_B > \overline{T_B};\quad \frac{\partial T_B}{\partial Z} > \gamma_{BA};$$

$$w_{conv} = 0; \qquad T_B \le \overline{T_B}; \quad \frac{\partial T_B}{\partial Z} \le \gamma_{BA}, \tag{5.18}$$

где α – эмпирическая константа; T_B – виртуальная температура; $\overline{T_B}$ – средняя по площади виртуальная температура; γ_{BA} – влажно-адиабатический градиент температуры; ΔZ – толщина слоя.

Таким образом, вертикальные движения, участвующие в рассеянии газоаэрозольных выбросов складываются из крупномасштабных вертикальных движений, рассчитываемых из уравнения неразрывности с учетом орографии и конвективных вертикальных движений:

$$w = w_{macr} + w_{conv}. \tag{5.19}$$

В предлагаемой модели для численного решения системы уравнений (5.4)–(5.13) был выбран конечно-разностный метод, хорошо зарекомендовавший себя во многих численных моделях переноса примеси. При этом дифференциальные уравнения, описывающие исходную задачу аппроксимировались конечно-разностной схемой:

$$\prod_{S=1}^{p}\left(E - \frac{\Delta t}{2}L_S\right)\left(\varphi_i^{n+1} + \varphi_i^n\right) = \sum_{S=1}^{p}\Delta t L_S\left(\varphi_i\right)^n + \Delta t S_i^{n+1/2}, \tag{5.20}$$

где $L_S\left(\varphi_i\right) = \dfrac{\partial\left(v_S\varphi\right)}{\partial x_S} + \dfrac{\partial}{\partial x_S}\left(K_S\dfrac{\partial\varphi}{\partial x_S}\right)$, $(S = 1, 2, 3)$, S_i – члены уравнения, описывающие источники; Δt – шаг по времени.

Схема (5.20) является двухслойной разностной схемой с расщепляющимся оператором, имеет второй порядок точности по времени и является абсолютно устойчивой.

При реализации разностной схемы (5.20) решение находилось не для самой функции φ на $g + 1$ шаге, а для ее превращения за шаг по времени $\varepsilon_o^{q+1} = \varphi_o^{q+1} - \varphi_o^q$. Этот метод реализации позволил избавиться от аппроксимации смешанных производных. Реализация схемы по каждому пространственному направлению осуществлялась методом прогонки.

Основной трудностью, с которой приходится сталкиваться при формулировке разностной задачи, является аппроксимация адвективных операторов уравнения переноса. Сложность заключается в том, что при решении уравнения для положительно определенных функций конечно-разностная схема должна удовлетворять следующим основным требованиям:

– обладать малой счетной вязкостью, то есть иметь порядок аппроксимации по времени и пространству не ниже второго;

– быть монотонной, то есть не генерировать нефизических, отрицательных значений;

– быть консервативной, то есть удовлетворять уравнению сохранения массы в заданном объеме;

– иметь малую фазовую ошибку, то есть переносить максимальные значения функции, и ее градиенты с заданной скоростью.

В этой связи во втором разделе был проведен анализ известных в литературе и наиболее часто используемых в гидродинамических моделях конечноразностных схем для численного решения уравнения адвекции.

В этой же части работы приведен способ построения гибридной саморегулирующейся схемы, основанной на схемах направленных и центральных разностей, отвечающей перечисленным требованиям. Гибридный оператор $L(\varphi_i)$, аппроксимирующий адвективную часть дифференциального пространственного оператора имеет вид:

$$\begin{gathered} L''(\varphi_i) = \alpha_{i+1/2}\varphi_{i+1/2} - \frac{1}{2}\left|\alpha_{i+1/2}\right|\Delta_{i+1/2}\varphi_i\theta_{i+1/2} - \\ -\alpha_{i-1/2}\varphi_{i-1/2} + \frac{1}{2}\left|\alpha_{i-1/2}\right|\Delta_{i-1/2}\varphi_i\theta_{i-1/2}; \\ \alpha_{i+1/2} = \left(\Delta t / \Delta x\right)\left(v_{i+1/2}\right)_S, \quad S = 1, 2, 3; \\ \varphi_{i+1/2} = \frac{1}{2}\left(\varphi_i + \varphi_{i+1}\right); \quad \Delta_{i+1/2} = \varphi_{i+1} - \varphi_i; \quad \theta_{i+1/2} = \left(\frac{\Delta_{i+1/2}\varphi_i}{\left|\varphi_{i+1}\right| + \left|\varphi_i\right|}\right)^2. \end{gathered} \tag{5.21}$$

Этот гибридный оператор аппроксимирует дифференциальный оператор со вторым порядком точности, сохраняя при этом локальную монотонность и на не гладких участках решения (при $\theta \to 1$) сводится к схеме направленных, а на гладких (при $\theta \to 0$) – к схеме центральных разностей.

Диффузионная часть дифференциального оператора $\overline{L}(\varphi_i)$ аппроксимировалась со вторым порядком точности по трехточечной схеме:

$$\overline{L}(\varphi_i) = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} K_s\left(\varphi_{i+1} - 2\varphi_i + \varphi_{i-1}\right). \tag{5.22}$$

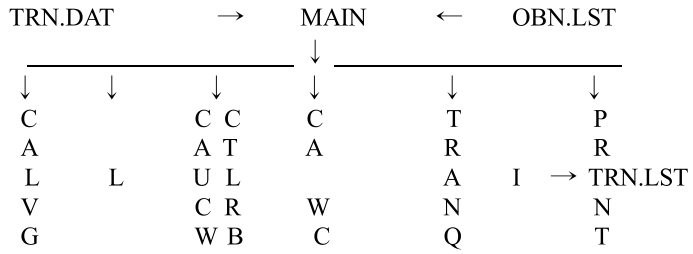
В случае введения неравномерного шага и переменного по вертикали коэффициента вертикальной диффузии дифференциальный оператор $L_3(\varphi_i)$ аппроксимировался модифицированными операторами:

$$\begin{gathered} L_3(\varphi_i) = \hat{\hat{L}}(\varphi_i) + \overline{\overline{L}}(\varphi_i); \\ \hat{\hat{L}}(\varphi_i) = \alpha_{i+1/2}\left(z_1\varphi_{i+1} + z_2\varphi_i\right) - \frac{1}{2}z_1\left|\alpha_{i+1/2}\right|\Delta_{i+1/2}\varphi_i\theta_{i+1/2} - \\ -\alpha_{i-1/2}\left(z_1\varphi_i + z_2\varphi_{i-1}\right) - \frac{1}{2}z_2\left|\alpha_{i-1/2}\right|\Delta_{i-1/2}\varphi_i\theta_{i-1/2}; \\ \overline{\overline{L}}(\varphi_i) = \frac{2\Delta t}{\Delta H_1 + \Delta H_2}\left(\frac{K_{i+1/2}}{\Delta H_1}\varphi_{i+1} - \left(\frac{K_{i+1/2}}{\Delta H_1} + \frac{K_{i-1/2}}{\Delta H_2}\right)\varphi_i + \frac{K_{i-1/2}}{\Delta H_2}\varphi_{i-1}\right); \\ z_1 = \frac{\Delta H_2}{\Delta H_1}; \quad z_2 = \frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}; \quad \Delta H_1 = H_{i+1} - H_i; \quad \Delta H_1 = H_i - H_{i-1}. \end{gathered}$$

Программа реализована на персональной ЭВМ PENTIUM, на языке программирования ФОРТРАН-77.

Функциональная блок-схема программы

Основная программа MAIN является управляющей и осуществляет ввод массивов и констант, необходимых для работы программы, таких как количество точек сетки по горизонтали и вертикали.



Далее в диалоговом режиме с экрана дисплея вводится информация о количестве суток на которое ведется расчет, о количестве, местоположении, высоте и мощности источников как непрерывного действия, так и дающих аномальный выброс на заданном шаге по времени.

Из файла данных TRN.DAT считывается информация о высоте уровней на которых ведется расчет и массивы, определяющие геометрические высоты и параметр шероховатости в точках регулярной сетки.

Из файла данных OBN.LST считывается информация о вертикальном профиле давления, трехмерных полях температуры, точки росы и компонентов скорости ветра в узлах регулярной сетки, полученные в результате объективного анализа этих метеоэлементов. Программа осуществляет обращение ко всем параметрическим процедурам, а также интегрирование по времени на заданное число суток.

Процедура CALVG осуществляет расчет дополнительной исходной информации: скорости гравитационного оседания в зависимости от радиуса; плотности вещества и атмосферного давления; пересчет временного шага, исходя из выполнения условия Куранта-Фридрихса-Леви.

Процедура CALCW осуществляет расчет фоновых вертикальных движений путем интегрирования уравнения неразрывности.

Процедура CTURB осуществляет расчет вертикальных профилей коэффициента турбулентного обмена в зависимости от устойчивости атмосферы, параметров шероховатости подстилающей поверхности и скорости ветра.

Процедура CALWC осуществляет расчет конвективных вертикальных движений, связанных с неравномерным перегревом подстилающей поверхности и в частности с температурным влиянием прудов охладителей.

Основным модулем является процедура TRANQ, которая осуществляет численное интегрирование уравнения модели в пространственно – временных координатах. Она определяет изменения массовой концентрации загрязняющих

веществ и оценку их суточного осаждения на подстилающую поверхность в зависимости от направления и скорости ветра, скорости гравитационного оседания частиц, а также величины коэффициентов турбулентной диффузии.

Процедура PRINT выводит на экран дисплея и АЦПУ поля плотности осажденных веществ (г/м^2), сумму выброшенных загрязняющих веществ, оставшуюся в атмосфере суммарную концентрацию и суммарную массу осажденных веществ.

Процедура также выводит на экран дисплея и АЦПУ карты изолиний, плотности осажденных загрязняющих веществ и приземных концентраций.

Как уже упоминалось выше, результаты проверки численной схемы, используемой для аппроксимации дифференциального уравнения переноса примеси и граничных условий для этого уравнения подробно изложены во втором разделе. В этом разделе мы опишем тестовые эксперименты, которые были проведены для доказательства правильности работы модели.

Из файла данных синоптических и аэрологических наблюдений выбирались и затем интерполировались в узлы заданной сетки давление, температура, точка росы и компоненты скорости ветра (U, V). Область счета составляла 30×30 км, с шагом сетки $\Delta x = \Delta y = 1$ км по горизонтали и 5 км с переменным по высоте шагом по вертикали. Затем из уравнения неразрывности рассчитывался вертикальный компонент скорости W. Задавалось пять непрерывных источника, выбрасывающих загрязняющие вещества. Координаты источников соответствовали следующим точкам сетки:

– первый источник: $i = 4$, $j = 4$, $k = 3$;
– второй источник: $i = 8$, $j = 4$, $k = 2$;
– третий источник: $i = 6$, $j = 16$, $k = 2$;
– четвертый источник: $i = 16$, $j = 6$, $k = 2$;
– пятый источник: $i = 10$, $j = 10$, $k = 3$.

Количество выбрасываемой примеси 0,5; 1,0; 1,0; 0,5; 1,0 г/с соответственно. Эффективная высота выбросов составляла 100 м, что соответствовало третьему уровню модели ($k = 3$).

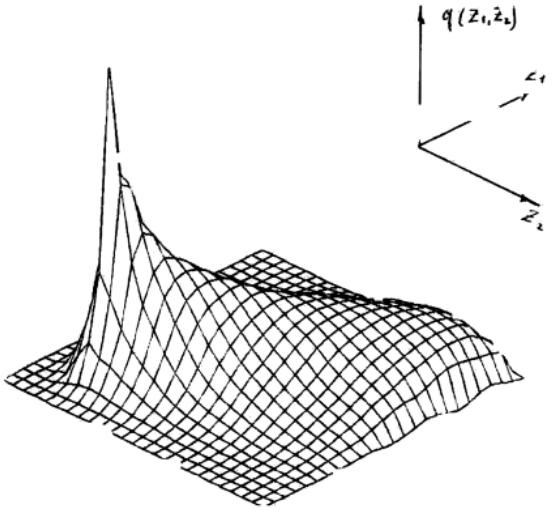
На шестидесятом шаге по времени (через 6 часов) на пятом источнике происходил аномальный выброс, когда за один шаг по времени (360 с) выбрасывалось 10^4 г загрязняющих веществ. Эффективная высота аномального выброса составила 190 м, что соответствовало четвертому уровню модели ($k = 4$). Далее под действием поля ветра, горизонтальной и вертикальной диффузии происходило распространение загрязняющих веществ и их выпадение на подстилающую поверхность в основном за счет их гравитационного и турбулентного оседания.

Через каждые сутки на печать выдавались поля:

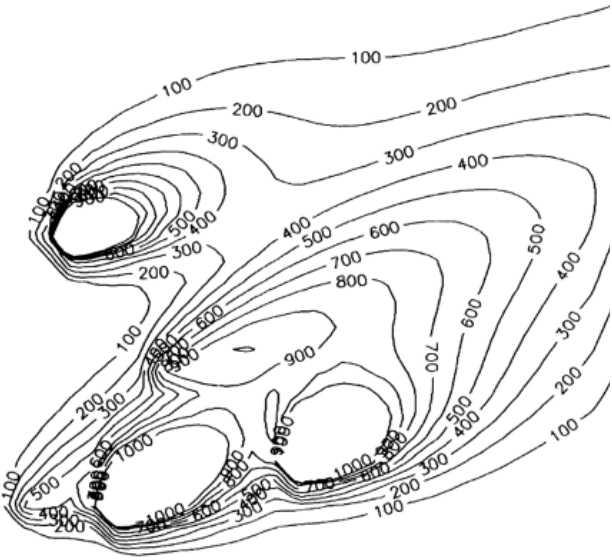
– выпавшей на подстилающую поверхность примеси (г);

– оставшейся в воздухе примеси (г) на 40, 100, 190, 350 м соответственно.

Поле выпавшей примеси выдавалось также в виде изолиний для наглядности и удобства анализа. Также для контроля выдавались значения: суммы выброшенных загрязняющих веществ (г); суммы выпавшей на подстилающую поверхность примеси (г); суммы оставшихся в атмосфере веществ (г) и отношение выпавших к выброшенным источниками загрязняющих веществ в процентах. На рис. 24 приведены изолинии плотности (в мкг/м^2·сутки) выпадения аэрозольной примеси с плотностью $\rho = 1$ г/см^3 и радиусом 1МКМ от пяти описанных выше источников, через 1 сутки.



а



б

Рис. 24
а – распределение примесей от одного источника;
б – изолинии плотности выпадения (в мкг м^{2}сут)

Результаты численных экспериментов на ЭВМ с моделью переноса загрязняющих веществ по реальным данным дают возможность говорить о достаточно реалистических прогнозах как траекторий переноса примеси в заданных регионах, так и о значениях концентраций примесей в атмосфере. Программная реализация модели и организация начальных данных позволяют легко модифицировать параметры настройки модели, выбирать произвольный регион на территории Северного полушария, число точек сетки интегрирования, количество уровней, координаты источников выбросов и т.д.

Разработанные программные средства могут быть использованы для численных прогностических экспериментов при моделировании переноса примесей в атмосфере от поля источников с различной интенсивностью и плотностью загрязняющих веществ.

5.4. Модель расчета концентрации от нестационарного непрерывного источника при аварийном выбросе

В работе [22] предлагается численный алгоритм решения задачи турбулентной диффузии примеси от нестационарного приподнятого точечного источника в пограничном слое атмосферы и анализ влияния изменения мощности выброса на результирующие характеристики загрязнения [416].

Нестационарная задача диффузии, представленная в виде комбинации гауссовской аппроксимации – для расчета диффузии в поперечном по отношению к переносу направлении, турбулентной диффузии по вертикали, адвективного переноса по оси факела и формируется следующим образом:

$$\overline{q}(t,x,y,z) = \frac{\exp\left(-\frac{y^2}{2}\right)\delta y^2}{\sqrt{2\pi\delta y}} S(t,x,z); \tag{5.23}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + v(z)\frac{\partial S}{\partial x} - w\frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}K(z)\frac{\partial S}{\partial z}. \tag{5.24}$$

При граничных условиях:

$$S|_{t=0} = 0; \tag{5.25}$$

$$S|_{\substack{x=0\\t=0}} = \frac{Q(t)}{v(h)}\delta(z-h); \tag{5.26}$$

$$K\frac{\partial S}{\partial z} + wS = \beta S|_{z=z_0}; \tag{5.27}$$

$$S|_{z\to\infty} = 0; \tag{5.28}$$

$$K\frac{\partial S}{\partial z}\bigg|_{z\to\infty} = 0. \tag{5.29}$$

Здесь *s* и *q* – «плоская» и объемная концентрация соответственно.

$$S(t,x,z) = \int_{-\infty}^{+\infty} q(t,x,y,z)\,dv, \tag{5.30}$$

где $Q(t)$ – мощность выброса; h – высота источника; w – скорость гравитационного оседания примеси; β – коэффициент захвата примеси на подстилающей поверхности ($0 \le \beta < \infty$); $v(z)$ и $K(z)$ – вертикальные проекции скорости ветра и коэффициента турбулентности в пограничном слое; σ_y – дисперсия факела в поперечном ветру направлении y; t – время от начала работы источника; x – расстояние от источника; $\delta(z-h)$– дельта функции Дирака.

Задача в постановке (5.23)–(5.29) имеет следующее аналитическое решение при постоянных коэффициентах $v = v(h)$ и $k = k(h)$:

$$S(t,x,z) = \frac{Q\left(t-\frac{x}{v}\right)}{\sqrt{\pi}v} l - \frac{wz}{vk} - \frac{w^2 z}{4vk} \times$$
$$\times \left[\frac{E}{2\sqrt{\frac{kx}{v}}} - \frac{2\beta - w}{k} l - \frac{v(z+h)^2}{4kx} \int_p^{\infty} l^{-p^2} - \mu^2 d\mu \right]; \tag{5.31}$$

$$E = e^{-\frac{v(h-z)^2}{4kx}} + e^{\frac{v(h+z)^2}{4kx}}; \tag{5.32}$$

$$p = \frac{h+z}{2\frac{\sqrt{kx}}{v}} + \frac{2\beta - w}{2\frac{\sqrt{kx}}{v}}. \tag{5.33}$$

Такое решение (5.31) может удовлетворительно описать распространение сероводорода при аварийных выбросах из порывов трубопроводов в условиях эксплуатации КНГКМ.

Для газообразной примеси при $w = 0$ и $\beta = 0$ задача диффузии сведется к следующему:

$$\overline{q}(t,x,y,z) = \frac{\exp\left(-\frac{y^2}{2}\right)\delta y^2}{\sqrt{2\pi\delta y}} S(t,x,z)$$

при тех же граничных условиях, кроме условия (5.27):

$$K = \frac{\partial S}{\partial z} = 0, \tag{5.34}$$

где

$$S(t,x,z) = \frac{Q\left(t-\frac{x}{v}\right)}{\sqrt{\pi}v} \frac{E}{\frac{2\sqrt{kx}}{v}}; \tag{5.35}$$

E из (5.32).

Если к тому же предположить, что рассматривается задача распространения загрязнения от одного точечного источника, то есть без учета наложения полей загрязнения ($y = 0$), то задача еще несколько упростится, а именно:

$$\overline{q}(t,x,y,z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta y}} S(t,x,z)$$

при тех же граничных условиях, где $S(t, x, z)$ и E определяются соответственно по (5.31) и (5.32).

В пограничном слое перенос примеси существенным образом зависит от вертикальной неоднородности метеорологических элементов $v(z)$ и $k(z)$. Поэтому получение разумных количественных результатов обеспечивается только путем численного решения задачи диффузии с учетом реальных $v(z)$ и $k(z)$.

Для определения параметров $v(z)$ и $k(z)$ можно степенную модель, в которой полагается:

$$K(z) = K_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^{1-\varepsilon},$$

где $K_1 = \dfrac{\chi^2 v_1}{\ln \dfrac{z_1}{z_0}}$; $\chi = 0{,}4$ – постоянная Кармана; z – высота определения концентрации; v_1 – скорость на высоте 1 м, определяемая по формуле:

$$v(z) = v(10)(z/10)^p,$$

где p определяется по таблицам, в зависимости от класса устойчивости и параметра шероховатости; z_1 – высота замера; ε – определяется по таблице.

Стандартные отклонения распределения концентраций по оси y, то есть дисперсию факела, для расстояний от источника выбросы менее 10 км, можно рассчитывать по формулам, предложенным Пэскуила-Гиффорда [15].

Комплексная модель промышленных источников для расчета кривых σ_y использует следующие эмпирические выражения:

$$\sigma_y = 465{,}1163 \cdot \mathrm{tg}(m), \qquad m = 0{,}017453 \cdot (c - d \cdot \ln x),$$

где c, d – определяются по таблицам при классах устойчивости Пэскуила.

Идентификация метеопараметров в моделях турбулентной диффузии загрязняющих веществ в атмосфере. Численное и аналитическое решение уравнений турбулентной диффузии в моделях распространения загрязнения в атмосфере требуют определения зависимости основных метеопараметров от высоты. В случае отсутствия возможности измерений с достаточным разрешением по времени и по пространству возникает необходимость ее аппроксимации.

В слое трения (приземной слой), толщина которого зависит от температурной стратификации, происходит изменение скорости и направления с высотой.

В этом слое направление ветра с высотой испытывает поворот вправо, а модуль возрастает как логарифм высоты:

$$u(z) = \frac{v^*}{\chi} \ln \frac{z + z_0}{z_0},$$

где χ – постоянная Кармана; v^* – динамическая вязкость; z_0 – коэффициент шероховатости.

$$u^* = \frac{\chi u_\Phi}{\ln \frac{z_\Phi}{z_0} + Au},$$

где z_Φ – высота измерения скорости ветра (высота флюгера); Au – коэффициент, зависящий от класса устойчивости атмосферы.

По экспериментальным оценкам средняя толщина слоя перемешивания составляет для устойчивости стратификации (инверсия) 50 м, для безразличной (изотермия) ≈ 70 м, для неустойчивой (развитая конвенция) ≈ 100 м [17].

Как показывают наблюдения, существенное значение имеет вид распределения температуры по высоте, для определения которого разработано множество методов, доступных измерению у земли (скорость ветра, солнечная инсоляция и др.). Наиболее допустимыми являются метод Пэскуила [17].

Эти методы дают количественное значение градиента температуры в рассматриваемом слое (табл. 41).

Существенно улучшает модели турбулентной диффузии также знание вертикального распределения коэффициента турбулентной диффузии K_z [18]. Определению K_z на высоте 1 м по данным градиентных наблюдений посвящен ряд работ [17, 18]. При нейтральной стратификации все методы сводятся к одному и тому же соотношению:

$$K_z = z x_v^*.$$

Однако, при неравновесных состояниях для расчета используется специальная безразмерная функция:

$$\varphi_u \approx \frac{xz \frac{\partial u}{\partial z}}{v^*}$$

с учетом $K_z = \frac{x^2}{\varphi_u^2} \frac{\partial u_z}{\partial \ln z}$; $\quad u(z) = \frac{x^2}{\varphi_u^2} \frac{\Delta u_{z_1} - z_1}{\ln z_2 / z_1}$.

Зависимость φ_u от динамического (*Rf*) и градиентного (*Ri*) числа Ричардсона при неустойчивой стратификации имеет следующий вид:

$$\varphi_u = (1 - \sigma Rf)^{-1/4}; \quad \varphi_u = (1 - \sigma' Ri)^{-1/4},$$

где σ и σ' находятся в пределах от 12 до 18 и от 11 до 17 соответственно.

Таблица 41

Характеристики классов устойчивости и значения параметров, полученных по экспериментальным зависимостям

№ п/п	Качественная характеристика класса устойчивости	Описание погоды	Обозначение по Пэскуиллу	u	γ, $C_0/100M$	Б	μ
1.	Очень неустойчивое состояние развития конвекции	очень солнечная, летняя, тихая	A	1	−1,9	0,04	−100
2.	Неустойчивая, умеренная конвекция	солнечно, тепло	B	2	−1,9...−1,7	−0,03	−100
3.	Легкая неустойчивость, слабая конвекция	переменная облачность	C	5	−1,0...−1,5	−0,09...−0,002	−50
4.	Безразличное, нейтральное	облачно	Д	5	−1,4...−0,5	−0,001...0,001	0
5.	Слегка устойчивая слабая инверсия	переменная облачность ночью	E	3	−0,4...1,5	0,002...0,004	50
6.	Устойчивое состояние, умеренная инверсия	ясная ночь	F	2	1,6...4,0	+0,01...+0,04	100
7.	Очень устойчиво, сильная инверсия	то же	G	1	40	≥ 0,05	100

А для высоты 1 м:

$$Ri = \frac{g}{tz} \ln \frac{z_2}{1} \left(\frac{T_2 - T_1}{\left(u_2 - u_1\right)^2} \right),$$

где T_1, T_2 – температура воздуха на уровне 1 и 2 м или полуэмпирическое:

$$Ri = 0,033 \cdot \frac{H\left(T_u - T_z + 0,01H\right)}{v_H^2},$$

где T_u – температура на высоте H от поверхности; T_z – температура на высоте выброса z; $H = 300$ м или верхняя граница инверсии [17].

В условиях несложного рельефа и отсутствия застроек горизонтальные составляющие коэффициента турбулентности определяются соотношением:

$$K_{xy} = aK_z,$$

где $a = 2$ для устойчивой атмосферы, $a = 1$ для безразличной, $a = 0,5$ – для неустойчивой.

Таким образом, на основе стандартных метеонаблюдений можно определить вертикальное распределение скорости ветра, температуры и коэффициента турбулентности, детальное знание которых существенно улучшает модели распространения примесей в атмосфере.

Итак, изложены три возможных подхода к решению задачи динамического прогноза.

Анализ возможности использования методов численного моделирования показывает, что этот подход имеет наиболее развитую теоретическую базу и в принципе позволяет учитывать практически все основные факторы, влияющие на процессы рассеяния СДЯВ. В настоящее время этот метод реализован на ЭВМ ЕС-1045 [13], которая относится к классу техники с наиболее мощными вычислительными возможностями. Уже в процессе реализации стало очевидно, что даже этих возможностей недостаточно для реализации трехмерного варианта метода. Реализована была двухмерная модель, не учитывающая процессы рассеяния в плоскости вертикальной земной поверхности. Кроме того, накладывались достаточно жесткие ограничения на число узлов пространственной координатной сетки, в которых считаются концентрации. Только при оперировании с небольшими числами узлов, порядка 20–30, время счета для прогнозирования оставалось в разумных пределах (неравенство (1)). Для прогнозирования в достаточно больших областях, например: 20×30 км на КНГКМ, расстояние между узлами получается очень большим. Все это приводит к вычислительной неустойчивости данной реализации метода, что и было подтверждено при проведении численных экспериментов на ЭВМ. Результаты, которые получились при этом, не выдерживали никакой критики даже при анализе на основе самой элементарной логики рассуждений. Например, при достижении границы рассматриваемой области наблюдался эффект отражения фронта и распространения загрязнителя в обратном направлении. Итак, подытоживая анализ методов численного моделирования, можно констатировать несоответствие их условиям прогнозирования распространения сероводорода на КНГКМ. Мы как бы оказываемся зажатыми между двух требований: необходимая точность и ограничения на время решения. Одновременное их выполнение даже на быстродействующих ЭВМ в настоящее время нереально.

Далее, вторая и третья модели достаточно просты в реализации и во многом сходны в части использования эмпирических знаний о процессах распространения и диффузии. Детальный анализ показывает, что комбинированная модель является наиболее общей, в частности, она использует более сложные характеристики метеоситуации. Последнее можно констатировать как положительный фактор – это повышает точность расчетов, так и отрицательный, ибо становится необходимым проведение сложных измерений метеопараметров. В частности, требуется определение высотных распределений температуры, скорости ветра.

По степени устойчивости атмосферы выделяются три группы:

– инверсия (устойчивая), для которой характерно слабое турбулентное перемешивание в пограничном слое атмосферы;

– изотермия (равновесная) с умеренным турбулентным перемешиванием;

– конвекция (неустойчивая), при которой отмечается цельное турбулентное перемешивание.

Степень устойчивости определяется на основе фактических и прогностических данных об облачности, измеряемой (в баллах) и скорости ветра для рассматриваемого времени суток (ночь, день, утро, вечер) с учетом наличие или отсутствие снежного покрова.

На рис. 25 представлены изолинии концентрации распространение сероводорода при аварийных выбросах из порывов трубопроводов в условиях эксплуатации КНГКМ на уровне $Z = 2$ м, расчетные показатели которых дают отклонения не более 15 % с данными экспедиционных натурных исследовании.

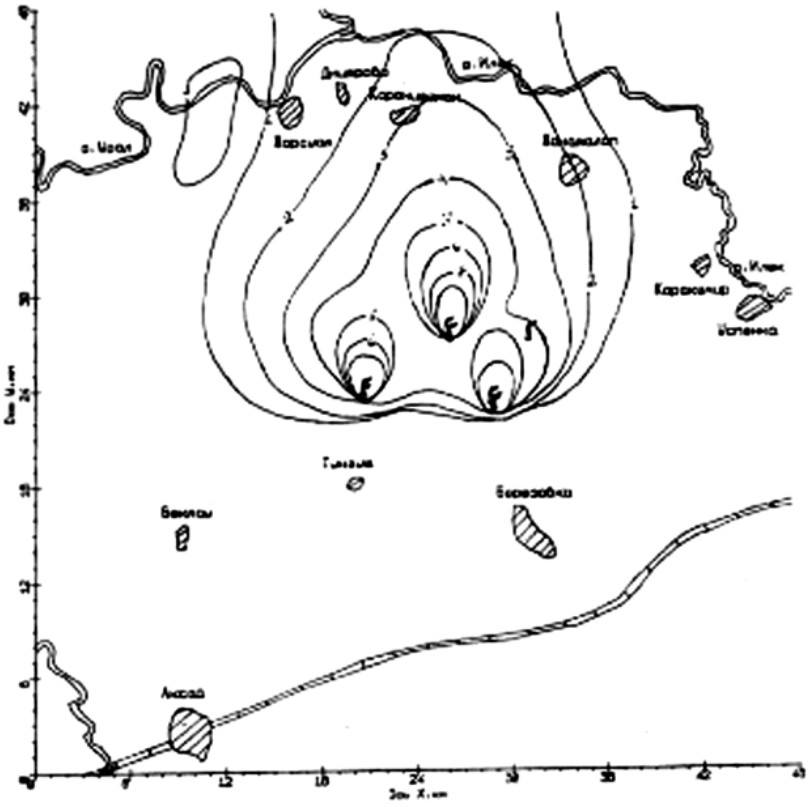


Рис. 25. Изолинии концентрации вредных веществ суммарного воздействия на уровне $Z = 2$ м

Итак, полуэмпирическая методика вполне применима для решения стоящих задач. Для определения условий и границ ее возможного использования, необходимо планирование и проведение серии экспериментов на объекте.

Анализ результатов работы в направлении создания системы прогноза динамики распространения опасного уровня концентрации сероводорода при аварийных выбросах приводит к следующим выводам:

1) ввиду многофазности потока в шлейфах и отсутствия достаточно адекватных математических моделей для таких потоков представляется проблематичным перекачиваемой смеси такой системы контроля шлейфов, в которой были бы обеспечены требуемая надежность, точность, оперативность обнаружения порывов;

2) акустические свойства трубопроводов (но не перекачиваемой смеси) могут быть положены в основу методики обнаружения порывов в шлейфах. В качестве приемников могут быть использованы датчики на основе пьезокирамики типа ЦТС-19. Полная стоимость разработки, поставки опытного образца системы контроля одного шлейфа составит ориентировочно 1850,0 тыс. тенге;

3) в системе контроля магистральных трубопроводов, в которых поток близок к однофазному, можно использовать как акустические характеристики труб, так и гидро-газо-динамические свойства потока;

4) на особо опасных направлениях может быть использована подсистема нейтрализации сероводородного облака;

5) методика решения задачи прогноза, разработанная в Главной геофизической обсерватории, является самой простой и удобной в использовании. Одновременно с этим она является и самой грубой. Но это будет вызывать не игнорирование опасных уровней загрязнения, а скорее некоторую перестраховку в расчетах, что в нашей ситуации вполне приемлемо. Преимуществом этой методики относительно комбинированной модели является и то, что она позволяет учитывать намерения метеоситуации в процессе рассеивания сероводородного облака;

6) значение метеорологических параметров, необходимые в методике, определяются по данным ближайшей репрезентативной метеостанции или специально организованного поста наблюдений. Скорость и направление ветра измеряются на высоте флюгера (10 м) с осреднением не менее 5 мин;

7) для КНГКМ рекомендуется методика решения прогнозной задачи;

8) адаптацию модели прогноза целесообразно провести в 2 этапа: первый этап – машинная адаптация и второй – на объектах.

5.5. Моделирование аварийных выбросов из глубоких скважин с использованием струйной модели

Обычно, аварийная ситуация на нефтегазодобывающих месторождениях сопровождается выбросами в атмосферу холодного и горячего смеса сероводородных продуктов. При этом под воздействием повышенного давления внутри нефтегазоносного пласта формируется струя смеси или факел, в которых исходное вещество преобразуется в продукты сгорания. Затем они перемешаются с воздухом посредством механизма турбулентности. Таким образом, распространение аварийных выбросов в приземном слое воздуха можно свести к задаче рассеяние турбулентной струи.

Однако, область применения струйной модели существенно зависит от многих факторов, таких как характер подстилающей поверхности, высота источника над землей, поле ветра, турбулентность атмосферы и др.

Так, в условиях развитой турбулентности (высокие скорости ветра, конвективные процессы в пограничном слое атмосферы) предлагаемая модель дает

результаты, близкие к реальным, только на расстояниях порядка 100 м. И наоборот, когда турбулентность сильно подавлена (например, в условиях зимней инверсий) выброс может существовать в виде струи до гораздо больших расстояний (1–10 км). Наконец, от высоты источника зависят как интенсивность турбулентности, так и поле ветра, причем чем ниже источник, тем сильнее влияние поверхности (особенно, со сложной орографией) и, следовательно, тем меньше район применимости струйной модели, в которой, надо сказать, никак не учитываются ни орография, ни турбулентность. Масштабом для оценки области применимости этой модели может быть выбрано расстояние, где скорость диссипации турбулентной энергии в струе сравнивается с таковой для атмосферы.

Итак, пусть источником является круглое сопло радиусом r_0, расположенное на земле, в точке $x = z = 0$. Скорость выбрасываемого газа v_0 постоянна по его сечению. Газ горит, причем смешение его с воздухом и полное сгорание происходят на срезе сопла, так что дальше движутся разогретые до температуры T_0 продукты сгорания. Направление выброса α_0 не обязательно вертикально. В приземном слое атмосферы предполагается вертикальная стратификация с градиентом температуры γ и постоянная скорость ветра w вдоль оси x_0.

Теория рассеяния свободных турбулентных струй разработана достаточно подробно и широко применяется в гидродинамике. Нашу задачу будем решать, следуя монографии Е.В. Бруяцкого.

Турбулентная струя, согласно Г.Н. Абрамовичу, разделяется на две области: начальную и основную. На начальном участке имеется ядро постоянной скорости, температуры и концентрации выброса, радиус которого r уменьшается от r_0 до нуля, а область смещения, наоборот, увеличивается до b_H.

Исходными являются уравнения гидротермодинамики в системе координат, связанной с осью струи, относительно которой предполагается цилиндрическая симметрия в распределении зависимых величин. После некоторых преобразований эти уравнения интегрируются в плоскости, перпендикулярно оси струи [317]:

$$\frac{\partial}{\partial s}\int_0^b v_s\left(v_s^2 - w_s^2\right) r dr = 2\int_0^b v_s F_s r dr - 2\int_0^b \frac{\tau}{\rho_0}\frac{\partial v_s}{\partial r} r dr; \tag{5.41}$$

$$\frac{\partial}{\partial s}\int_0^b v_s\left(v_s - w_s\right) r dr = \int_0^b F_s r dr - \frac{\partial w_s}{\partial s}\int_0^b \frac{\tau}{\rho_0}\left(v_s - w_s\right) r dr; \tag{5.42}$$

$$\frac{\partial}{\partial s}\int_0^b v_s^2 r dr = \int_0^b F_s r dr - \lambda\frac{\partial w_r}{2} b + w_r\frac{\partial}{\partial s}\int_0^b v_s r dr; \tag{5.43}$$

$$\frac{\partial}{\partial s}\int_0^b v_s\left(T - T_w\right) r dr = -\frac{\partial T_w}{\partial s}\int_0^b v_s r dr, \tag{5.44}$$

где F – вектор массовых сил; $\frac{\tau}{\rho_0}$ – сила турбулентного трения, действующая на единицу объема смеси; s – расстояние вдоль оси струи; r – расстояние от оси в поперечном сечении; T_w – стратификация атмосферы; λ – коэффициент сопротивления струи, а индексы s, r обозначают компоненты векторов относительно координатных ортов вдоль s и r соответственно.

Здесь $F_i = g_i \beta \Delta T$; $T_w = T_{w0} + \gamma z$; $g_s = g \cdot \sin\alpha$; $g_r = g \cdot \cos\alpha$; $\beta = 3{,}665 \cdot 10^{-3}$, где T_{w0} – температура на поверхности земли; g – ускорение свободного падения, ΔT – разность температур на оси струи и воздуха на соответствующей высоте.

К уравнениям (5.41)–(5.44) следует соотношения, связывающие координаты (s, r) с декартовыми координатами X, Z:

$$\frac{dx}{ds} = \cos\alpha; \tag{5.45}$$

$$\frac{dz}{ds} = \sin\alpha. \tag{5.46}$$

Приведем также соотношения для $\frac{\tau}{\rho_0}$:

$$\frac{\tau}{\rho_0} = -12\chi v^2 \left(1 - \frac{w_s}{v_s}\right)\left(1 - \frac{w_s}{v_s} - \chi_s \frac{w_r}{v_r}\right)\eta(1-\eta)^2 e^{-5R_i}, \tag{5.47}$$

где χ, χ_s – константы, функции η и Ri даются для каждого участка струи.

Система уравнений (5.41)–(5.46) решается при помощи гипотезы об автомодельности течения в турбулентных струях. Она состоит в том предположении, что распределения зависимых величин в различных сечениях струи подобны друг другу, т.е. описываются одними и теми же соотношениями.

Приведя уравнения (5.41)–(5.46) к безразмерному виду, вычисляя интегралы и производных, получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений в виде:

$$A - \frac{df}{ds} = F, \tag{5.48}$$

где F, f – вектора правых частей и независимых переменных, а A – матрица коэффициентов.

Система (5.48) решается методом Рунге-Кутта последовательно для начального и основного участка струи.

Модельные расчеты характеристик струи приводилось нами для следующих начальных значений переменных: радиус сопла $r_0 = 0{,}5$ м; начальная скорость выброса: $v_0 = 30$ м/с; стратификация атмосферы: $\gamma = 0{,}004$ и $-0{,}002$ гр/м; скорость ветра $W = 5$ м/с; угол выброса $\alpha_0 = 45°$ и $90°$. Результаты расчета приведены на рис. 26, где указаны высота подъема и дальность выброса вредных веществ при аварий.

Известно, что зимой очень часто реализуются мощные приземные инверсии, простирающиеся до высот 1–1,5 км. В этих условиях, даже при наличии сдвига ветра атмосферная турбулентность практически отсутствует, что подтверждается с натурными наблюдениями, когда дымовой шлейф почти без изменения переносится на несколько километров. Таким образом, при земных инверсиях наша модель может работать, по крайней мере, до расстояний 1–10 км.

Летние ночные инверсии гораздо слабее зимних, они формируется после захода солнца и быстро разрушаются утром, кроме того, летний инверсионный слой часто неустойчив, в его толщине наблюдаются такие явления, как перемежающаяся турбулентность, струйные течения, застой воздушных масс в складках местности, и т.д., так что область применимости струйной модели определяется местными факторами, и требует исследования конкретно для каждой местности.

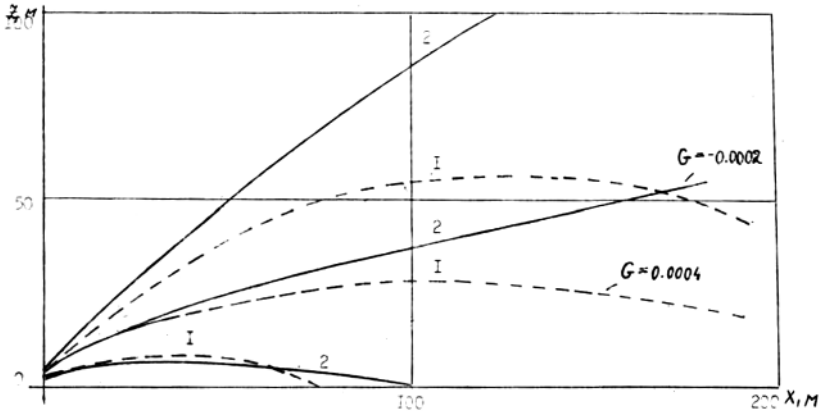


Рис. 26. Геометрия струи в условиях:
1 – температурной инверсии; 2 – в конвективных условиях

Далее, летом при ясной солнечной погоде формируется конвективный пограничный слой (КПС), который характеризуется не только развитой атмосферной турбулентностью, но и мощной ячейковой конвекцией. А из-за того, что атмосферная турбулентность не учитывалась при выводе основных соотношений теории, ее применение для расчетов струи в КПС, вообще говоря, неправомерно. Однако, как отмечалось в начале раздела, на малых расстояниях от источника, когда энергия турбулентности внутри струи больше атмосферной, эта модель еще применима, и масштаб применимости составляет десятки сот метров в зависимости от мощности выброса при одинаковых атмосферных условиях. Ячейковая конвекция имеет масштаб порядка ста метров и это расстояние будет являться масштабом области применимости нашей модели, если предыдущее рассмотрение даст расстояние большее ста метров.

Итак, коротко мы рассмотрели предельные состояния атмосферы, для которых модель струи применима наиболее полно и, наоборот, лишь вблизи от источника. На основании изложенного сделаем некоторые выводы:

1. В данном пункте показано, что распространение в атмосфере аварийных выбросов газа можно описать так называемой теорией турбулентных струй.

2. Область применимости струйной модели определяется в основном не геометрией источника, а состоянием атмосферы. Качественное рассмотрение состояний атмосферы показывает, что данная модель может успешно применяться в зимних инверсионных условиях до расстояний, по крайней мере, в несколько километров, а летом ночью и днем от десятков до сотен метров, причем эти расстояния существенно зависят от местной орографии, и должны, строго говоря, определяться в условиях конкретной местности.

3. Что касается прогноза концентрации продуктов сгорания, то грубо эту величину можно оценить, как $C(X,Z)=\dfrac{C_0}{\pi b^2}$.

6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАССОЭНЕРГООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В АТМОСФЕРЕ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ГЕОСИСТЕМ

Проведен расчет полей рассеяния примесей по трехмерной модели с учетом классификации атмосферной устойчивости, метеорологических параметров и параметризации источников выбросов.

Моделированы распространения вредных примесей на основе диффузионных моделей, проведены расчеты, а также анализ результатов вычисления. Небольшой объем, занимаемый программой оперативной памяти на ЭВМ, и высокая скорость вычислений, вследствие простоты диффузионных моделей, позволяют использовать этот подход для оперативных экспресс-расчетов полей распространения примесей для некоторой группы источников и оценки их влияния на близлежащие населенные пункты непосредственно при проведении измерений на борту исследовательской машины в реальном масштабе времени. Небольшой объем входной информации и знание параметров источников (изменяется лишь объем выбросов) позволит быстро проводить численные эксперименты с просмотром результатов на графическом терминале, и, в случае необходимости, выводит важную информацию на принтер графопостроителя.

Проведен расчет распространения примесей с применением гидродинамической модели рассеивания примесей в пограничном слое атмосферы для наиболее аномальных метеоситуаций в 4-х вариантах.

Произведено расчетное прогнозирование экономического ущерба от атмосферного загрязнения в регионе Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения, а также проанализирован экономический эффект природоохранных мероприятий и рассчитан предотвращенный ущерб в результате воздухоохранных мероприятий.

6.1. Экологическое картографирование районов технополиса

6.1.1. Построение геоэкологической карты с учетом орографии местности на примере Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения

С учетом силы тяжести, орографии местности (неровности земной поверхности), баланса влаги в атмосфере, притока тепла, в том числе и радиационного притока тепла, неоднородности атмосферных сред, ненасыщенной (насыщенной) атмосферы при наличии конденсации, вертикального движения в облачной атмосфере, а так же с учетом фронтальных поверхностей, численная модель бароклинной атмосферы имеет вид (2.116)–(2.119). Температура вычисляется по формуле (2.120). Диагностическая система решается для промежуточных точек горизонтальной сетки по схемам Г.И. Марчука [117] методом обычной прогонки

с краевыми условиями в виде (2.122). В общем случае эта задача приводится к виду (3.17)–(3.23) с начальными (3.24)–(3.24а) и граничными (3.25)–(3.27) условиями. Полученные численные значения метеорологических параметров (температура, скорость ветра, давление и др.) используются при численном решении уравнений (3.64). Граничные условия для задачи (3.64) следующие: на верхней границе слоя атмосферы высотой H – условие отсутствие примеси снизу, на нижней границе условия определяются взаимодействием осаждаемой примеси и подстилающей поверхности и задается в виде п. 3.1.7.1. На боковых границах (западная, восточная, южная, северная) граничные условия определяются в зависимости от направления входного потока в область, а начальные условия полагаются равными нулю. С учетом данных раздела 1 и табл. 33, получены следующие геоэкологические карты местности для Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения [403–418].

Рис. 27. Изолинии концентрации CO_2 в долях ПДК на высоте 250 м. Max CO_2 – 0,47

Геоэкологические карты переноса вредных примесей в конвективных условиях. Распространению примесей типа SO_2 и NO_2 в конвективных атмосферных условиях посвящены рис. 27–37. На этих рисунках представлены изолинии концентрации SO_2 и NO_2 (в долях превышения ПДК) на трех уровнях по высоте для момента времени, соответствующего полному продуванию района месторождения. Это время примерно равно $40000/u_r$ сек, где u_r – приземная скорость воздуха заранее для данного варианта расчета. И оно обычно соответствует периоду времени, когда распространение примесей приобретает установившийся характер. В серии расчетов (рис. 32–38) скорость ветра увеличена вдвое по сравнению с вариантом расчета, представленной на рис. 27–31. Видно, что усиление скорости ветра способствует более интенсивному выносу примесей из района месторождения.

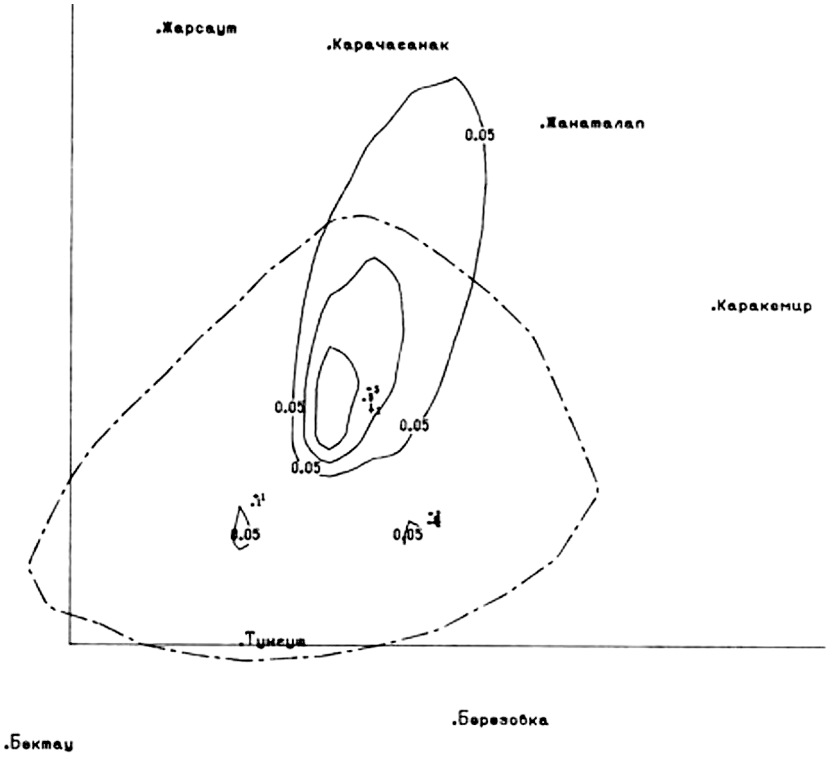


Рис. 28. Изолинии концентрации CO_2 в долях ПДК на высоте 650 м. Max CO_2 – 0,22

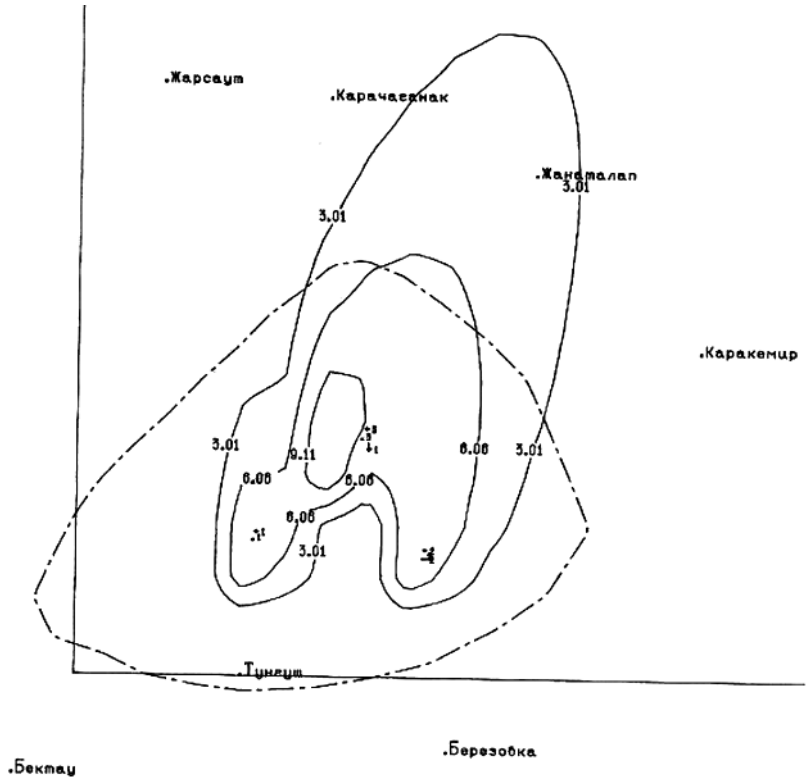


Рис. 29. Изолинии концентрации NO_2 в долях ПДК на высоте 50 м. Max NO_2 – 12,16

Наиболее сильным источником загрязнения, как уже отмечалось, является агрегат УКСП-16. Кроме того, эти источники имеют и наибольшую эффективную высоту выбросов, в рассматриваемых условиях порядка 60 м. Поэтому, как показывают рис. 31, 37, на этой высоте имеет место наибольшее превышение ПДК. Для NO_2 превышения ПДК наблюдается на всех высотах, в том числе и в приземном слое, в несколько раз. Это связано с большим объемом выброса этой примеси из агрегатов УКСП-16. Как видно из табл. 38, порядок превышения объема выброса NO_2 по сравнению с SO_2 составляет величину близкую к 500. Вклад остальных источников загрязнения в суммарное загрязнения уже не столь значительный и кроме того, они имеют сравнительно небольшую эффективную высоту (в пределах 50–100 метров). Наибольший интерес представляет распределение NO_2 на рис. 29–31.

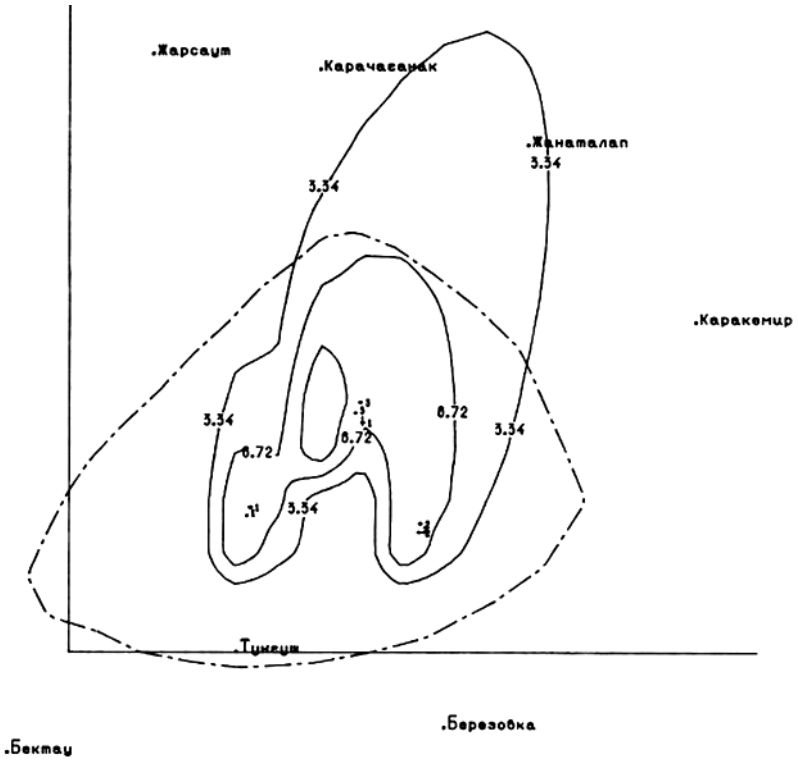


Рис. 30. Изолинии концентрации NO_2 в долях ПДК на высоте 250 м. Max NO_2 – 13,47

Примесь распространятся в направлении движения воздушной массы, причем, поскольку имеет место поворот вектора скорости влево в пределах пограничного слоя атмосферы, то аналогичную ориентацию имеет форма рассеивания на разных высотах. Это хорошо видно, например, из анализа рис. 29–31.

Геоэкологические карты переноса вредных примесей в инверсионных условиях. Распространение примесей в устойчивых атмосферных условиях, проводилось для двух вариантов: в первом случае скорость ветра в приземном слое выбрана равная 2 м/с (рис. 38–42), а во втором – 4 м/с (рис. 43–45).

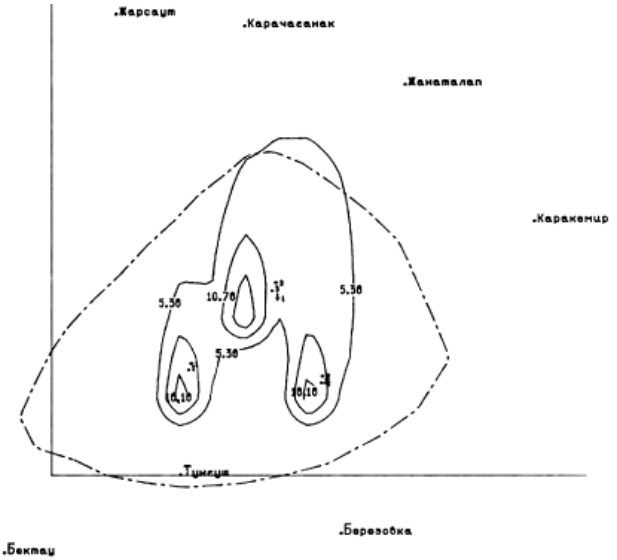


Рис. 31. Изолинии концентрации NO_2 в долях ПДК на высоте 650 м. Max NO_2 – 21,56

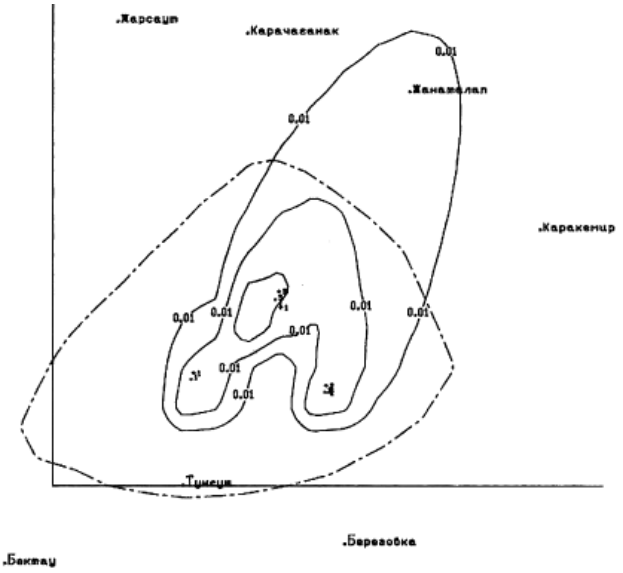


Рис. 32. Изолинии концентрации CO_2 в долях ПДК на высоте 50 м. Max CO_2 – 0,03

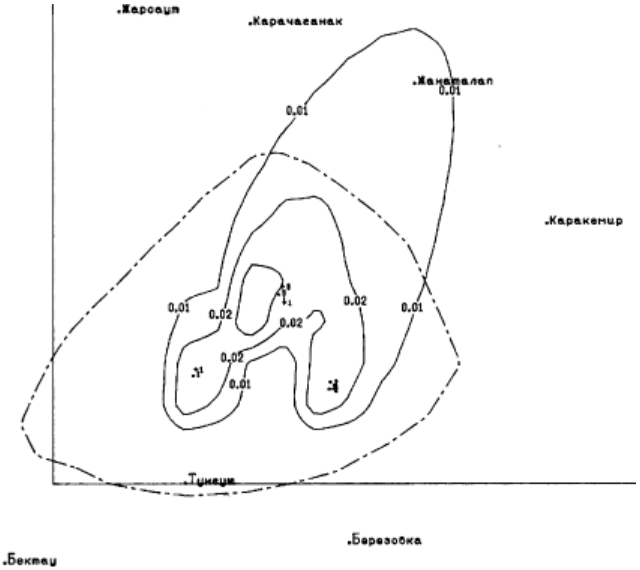


Рис. 33. Изолинии концентрации CO_2 в долях ПДК на высоте 250 м. Max CO_2 – 0,03

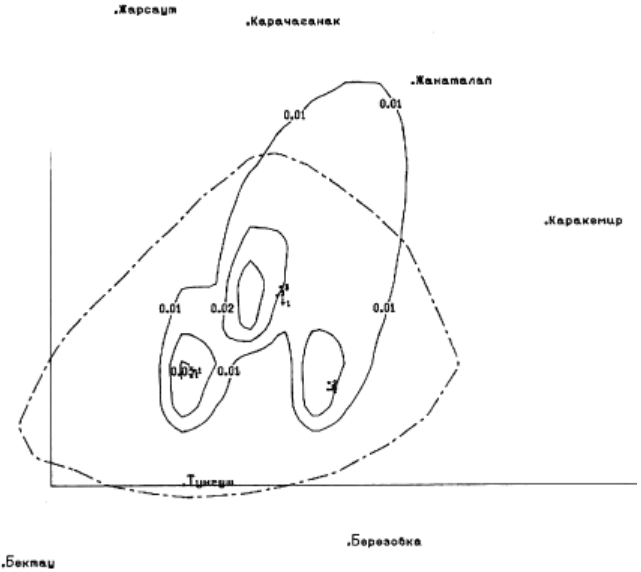


Рис. 34. Изолинии концентрации CO_2 в долях ПДК на высоте 650 м. Max CO_2 – 0,04

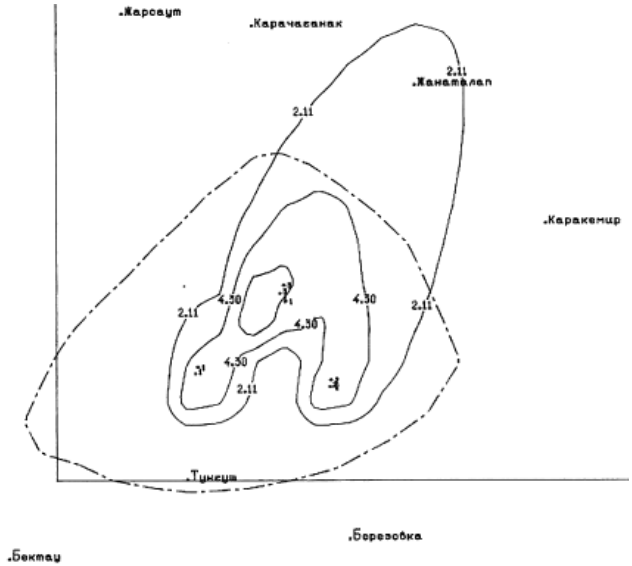


Рис. 35. Изолинии концентрации CO_2 в долях ПДК на высоте 50 м. Max CO_2 – 8,68.

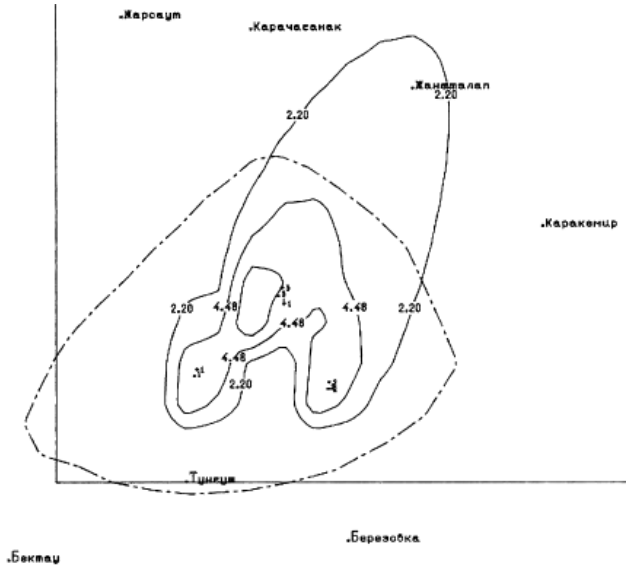


Рис. 36. Изолинии концентрации NO_2 в долях ПДК на высоте 250 м. Max NO_2 – 9,05

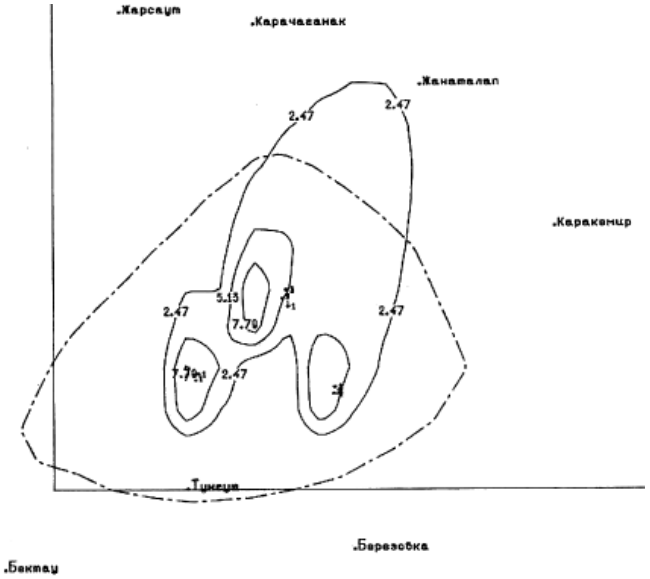


Рис. 37. Изолинии концентрации NO_2 в долях ПДК на высоте 650 м. Max NO_2 – 10,44

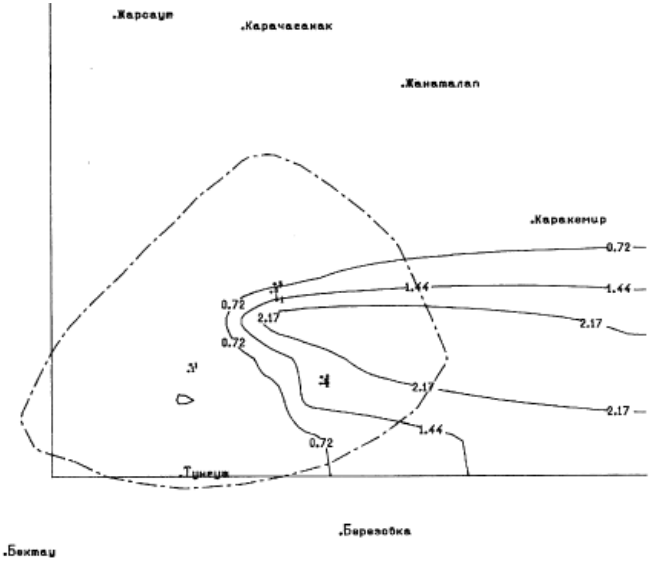


Рис. 38. Изолинии концентрации CO_2 в долях ПДК на высоте 10 м. Max CO_2 – 2,89

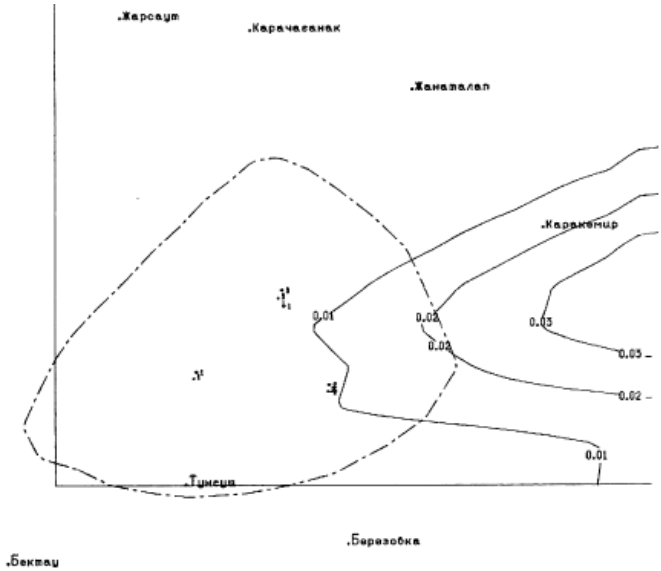


Рис. 39. Изолинии концентрации CO_2 в долях ПДК на высоте 70 м. Max CO_2 – 0,03

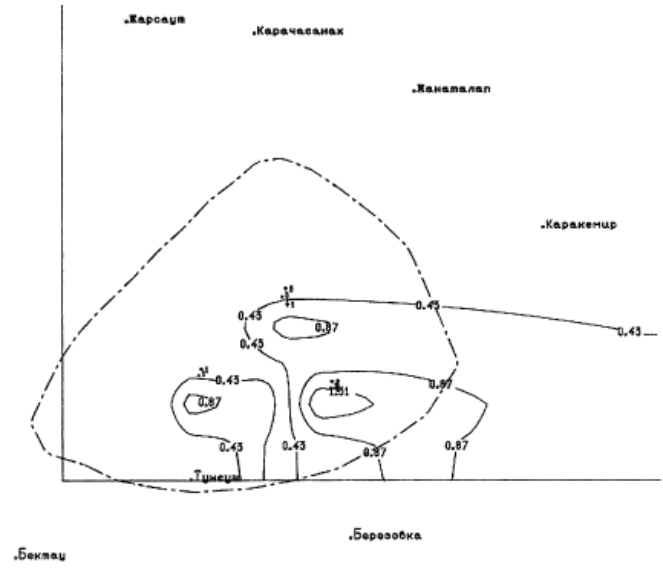


Рис. 40. Изолинии концентрации NO_2 в долях ПДК на высоте 10 м. Max NO_2 – 1,75

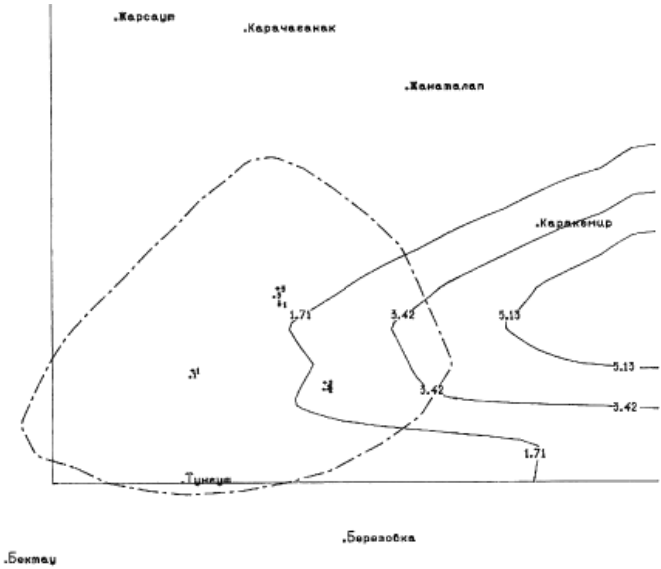


Рис. 41. Изолинии концентрации NO_2 в долях ПДК на высоте 70 м. Max NO_2 – 6,85

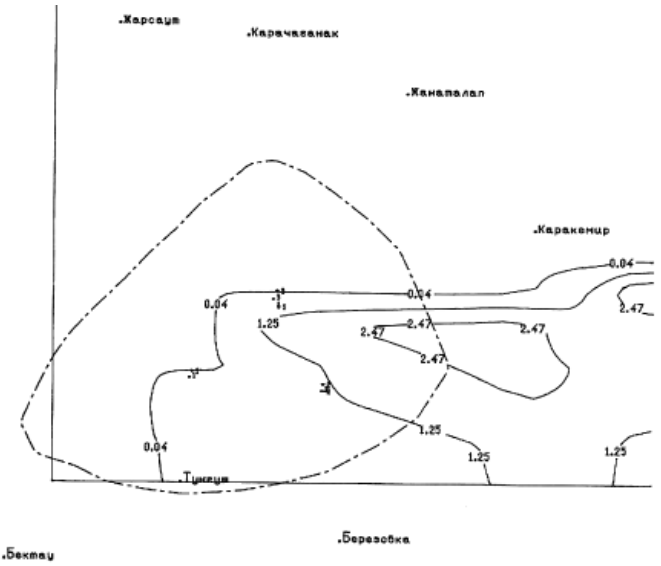


Рис. 42. Изолинии концентрации CO_2 в долях ПДК на высоте 10 м. Max CO_2 – 3,69

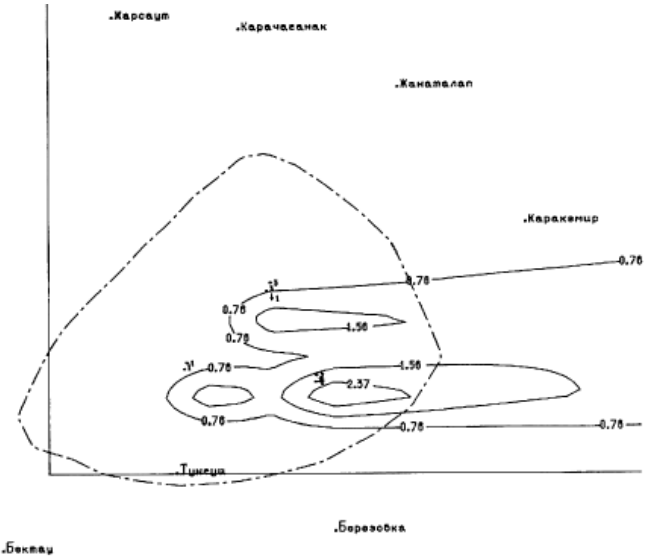


Рис. 43. Изолинии концентрации CO_2 в долях ПДК на высоте 70 м. Max CO_2 – 3,17

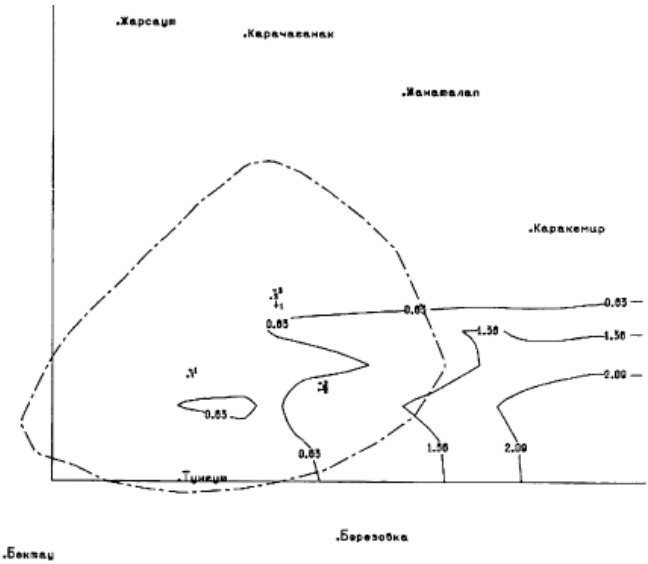


Рис. 44. Изолинии концентрации NO_2 в долях ПДК на высоте 10 м. Max NO_2 – 2,82

Время расчета, соответствовало периоду полного продувания района месторождения, имеющего протяженность порядка 40 км.

Увеличение скорости ветра приводит, к стимулированию более интенсивного выноса загрязнений за пределы этого района. Эффективная высота выбросов максимальна для агрегатов УКСП-16 (70–100 м), а для других источников загрязнения находится вблизи верхней границы приземного слоя (10–20 м). Поскольку наиболее мощные источники имеют достаточно большую эффективную высоту, то из-за инверсионных условий максимальное выпадение примесей в приземном слое наблюдается на значительном удалении от источников (рис. 45).

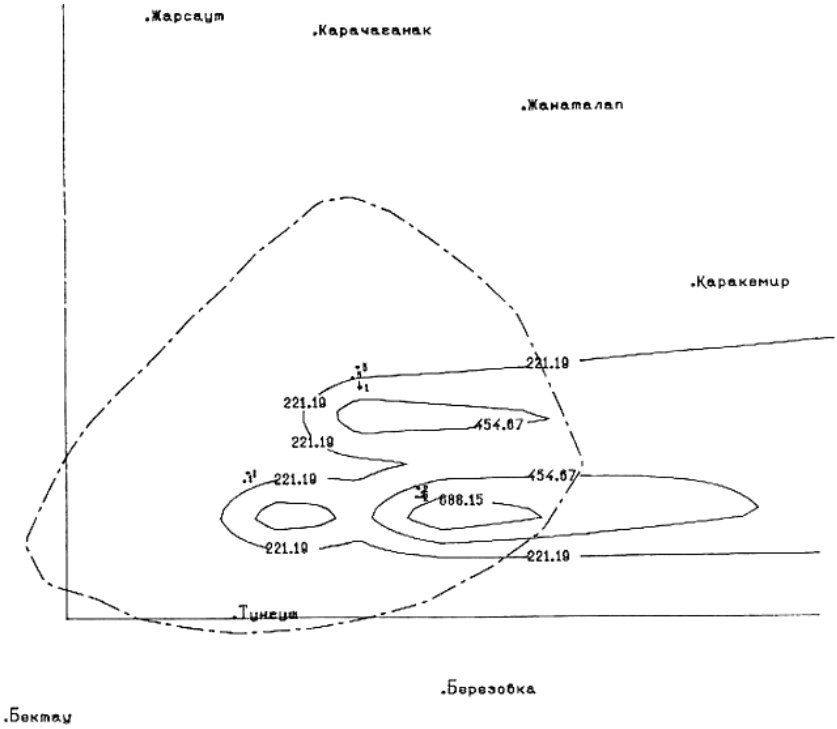


Рис. 45. Изолинии концентрации NO_2 в долях ПДК на высоте 70 м. Max NO_2 – 921,63

Распространение примесей происходит по направлению ветра, причем, также как и в конвективных условиях заметно изменение этого направления с высотой (поворот влево согласно модели Экмана). Отметим также, более интенсивное загрязнение примесью NO_2 на высоте, близкой к эффективной высоте выбросов. Превышение ПДК, например, на рис. 45, имеет порядок несколько сотен. Это объясняется тем, что в инверсионных условиях отсутствуют

восходящие потоки воздуха и слабо выражена вертикальная турбулентность, это приводит к локализации выбросов вблизи источников загрязнения. Наблюдается также, отмеченный при анализе расчетов по простейшей модели в устойчивых условиях, и, на первый взгляд, странный эффект, когда усиление ветра приводит к более интенсивному загрязнению вблизи земли и на фиксированной высоте порядка 70 м. Это связано с аналогичным фактом – увеличение скорости ветра при неизменных метеопараметрах, заметно уменьшает эффективную высоту выбросов. А это приводит, в свою очередь, к приближению высоты оси дымового факела к поверхности земли. Таким образом, можно сделать вывод, что наряду с известными опасными метеоусловиями, которые создаются при инверсиях и их сочетаниях со штилем, отмеченная метеоситуация также относится к числу наиболее опасных.

6.1.2. Ранжирование районов технополиса по степени экологической безопасности

Построение геоэкологической карты распространения вредных примесей на основе диффузионных моделей. Базовый алгоритм позволял рассчитывать поле концентраций загрязняющих примесей в плоскости «источник выброса – направление ветра» от локального источника (назовем это плоскостью *XOZ*). Пересчет поля концентрации на ось *OY* осуществляется с помощью соотношения:

$$q(x,y,z)=\frac{q(x,z)}{\sqrt{2\pi k_0 x}}\exp\left(\frac{-y^2}{4k_0 x}\right). \qquad (6.1)$$

Из формулы (6.1) следует, что наибольшая концентрация достигается при $y = 0$, т.е. на оси дымового факела *X*. От оси *X* в поперечном направлении y – концентрация убывает симметрично по экспоненциальному закону, причем с ростом x это убывание замедляется. Для достаточно больших x коэффициент k_0 начинает зависеть от x:

$$k_0(x) \approx xk_0. \qquad (6.2)$$

Основная часть примесей, таким образом, сосредоточена в сравнительно узкой струе (факеле), ось которого соответствует $y = 0$.

Фактическая высота выброса примеси в атмосферу равна геометрической высоте трубы только в тех случаях, когда температура выбрасываемой примеси не отличается от температуры окружающего воздуха и его скорость истечения мала. Это условие не соблюдается при выбросе газовой смеси из труб месторождения. Начальная скорость струи и перегрев примеси ведут к дополнительному ее подъему. При этом высота источника становится равной некоторой эффективной высоте:

$$H_{\text{ЕФФ}} = H_{\text{Г}} + \Delta H, \qquad (6.3)$$

где $H_{\text{Г}}$ – геометрическая высота трубы; $H_{\text{ЕФФ}}$ – эффективная высота трубы; ΔH – высота подъема струи над трубой вследствие инерции движения и плавучести.

В работах Берлянда [314, 316] была предложена приближенная формула для определения начального подъема:

$$\Delta H = \frac{3,75 w_0 R_0}{u} + \frac{1,6 g v \Delta T}{T_a u^3}, \qquad (6.4)$$

где $v = \pi R_0^2 w_0$ – объем уходящих газов в единицу времени; u – скорость ветра на высоте флюгера (z_Φ = 10 м); w_0 – начальная скорость уноса примеси; R_0 – радиус трубы; ΔT – перегрев примеси относительно температуры T_a окружающей среды.

В табл. 40 представлены полученные в результате расчета по формуле (6.4) эффективные высоты труб для девяти групп источников и девяти вариантов расчетов. Из таблицы следует, что при некоторых метеорологических условиях эффективная высота труб может отличаться от геометрической на порядок.

При проведении расчетов удобно ввести две системы координат. Первая система $X'Y'Z'$, связанная с источником и направлением ветра с метровым масштабом. Вторая система XYZ, связанная с картой месторождения и, соответственно, с километровым масштабом. Моделирование происходит в системе $X'Y'Z'$, а затем осуществляется перерасчет в систему XYZ путем параллельного переноса:

$$x = x' - x_s;$$

$$y = y' - y_s. \qquad (6.5)$$

Таблица 42

Эффективная высота трубы

Номер ист.	H_Γ, м	Эффективная высота трубы $H_{\text{ЕФФ}}$, м							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	12,95	13,31	13,31	13,93	13,93	13,17	13,17	13,47	13,47
2	12,95	13,31	13,31	13,93	13,93	13,17	13,17	13,47	13,47
3	23,0	23,71	23,71	24,91	24,91	23,4	23,44	24,01	24,01
4	13,0	47,12	47,12	192,42	192,42	28,45	28,45	74,26	74,26
5	13,0	47,36	47,36	194,41	194,41	28,52	28,52	74,82	74,82
6	13,0	39,03	39,03	143,31	134,31	25,22	25,22	58,82	58,82
7	10,92	12,11	12,11	13,97	13,97	11,67	11,67	12,60	12,60
8	10,92	12,11	12,11	13,97	13,97	11,67	11,67	12,60	12,60
9	10,92	12,11	12,11	13,97	13,97	11,67	11,67	12,60	12,60

Условия проведения расчетов. Алгоритм моделирования распространения загрязняющих примесей в атмосфере месторождения был реализован в виде программы на языке ФОРТРАН.

Вследствие некоторых модельных особенностей численные эксперименты несколько отличаются от представленных в других разделах отчета, но тем не менее отражают наиболее характерные метеорологические ситуации в регионе, и учитывают наиболее важные источники. Исходные данные для расчетов приведены в табл. 11. Характерные масштабы расчетов:

В системе $X'Y'Z'$ – 2500×2500×200 м.

В системе XYZ – 25×25×0,2 км.

Варианты 1–4 соответствуют устойчивой стратификации ($\delta T > 0$, где δT – разность температур на двух высотах в приземном слое воздуха $Z_2 = 10$ м, $Z_3 = 100$ м). Варианты 5–8 соответствуют неустойчивой стратификации ($\delta T > 0$). Скорость ветра u_1 определяет, где x_s, y_s – координаты источника в системе *XYZ*, и поворота на угол ϑ в направлении ветра:

$$x = x'\cos\vartheta + y'\sin\vartheta;$$

$$y = -x'\cos\vartheta + y'\cos\vartheta. \qquad (6.6)$$

Итоговое поле концентрации примеси находится как суперпозиция полей от локальных источников загрязнения:

$$q_{ij} = \sum_{k=1}^{n_s} q_{ij}^k, \qquad (6.7)$$

где n_s – число источников.

Ветер на высоте $Z_1 = 1$ м, дальнейшее изменение скорости ветра с высотой определяется по формуле:

$$u = u_1 \frac{in\left(z/z_0\right)}{in\left(z_1/z_0\right)}, \qquad (6.8)$$

где $Z_0 = 0{,}01$ – параметр шероховатости.

Направление ветра юго-восток (варианты 1–4) и северо-восток (варианты 5–8).

Уровни наблюдения брались на двух высотах $z = 10$ м и $z = 100$ м. В табл. 41 приведены данные о высоте приземного слоя h, которая рассчитывается в модели по формуле:

$$h = 0{,}05\frac{K_1}{z_1 w_z}, \qquad (6.9)$$

где $w_z = 10^{-4}$ – вертикальная составляющая скорости вращения Земли.

Таблица 43

Высота приземного слоя, рассчитанная по модели

Номер варианта	T, °C	T, °C	м/с	T, °C	м	h
1	1	2	4	315	10	54,04
2	1	2	4	315	100	54,04
3	1	2	2	315	10	23,74
4	1	2	2	315	100	23,74
5	–1	15	6	45	10	102,98
6	–1	15	6	45	100	102,98
7	–1	15	3	45	10	54,79
8	–1	15	3	45	100	54,79

Возможность рассчитывать величину h по формуле (6.9) является одним из важных преимуществ данной модели.

На рис. 46–53 представлены результаты расчетов распределения двуокиси серы SO_2 по территории месторождения, отмеченного контуром. Выделены три группы из девяти групп источников, соответствующие своим истинным положениям. Карта местности приводится в таком виде, что ось *OY* направлена на север, а ось *OX* – на восток. Номера изолиний соответствуют следующим значениям концентрации:

$$c(x,y)=\frac{q(x,y,z)}{\text{ПДК}}\cdot 10^{k/2-3,5}, \qquad (6.10)$$

где k – номер соответствующей изолинии; ПДК – предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе ($\text{ПДК}_{SO} = 0{,}05$ мг/м^3 – среднесуточная).

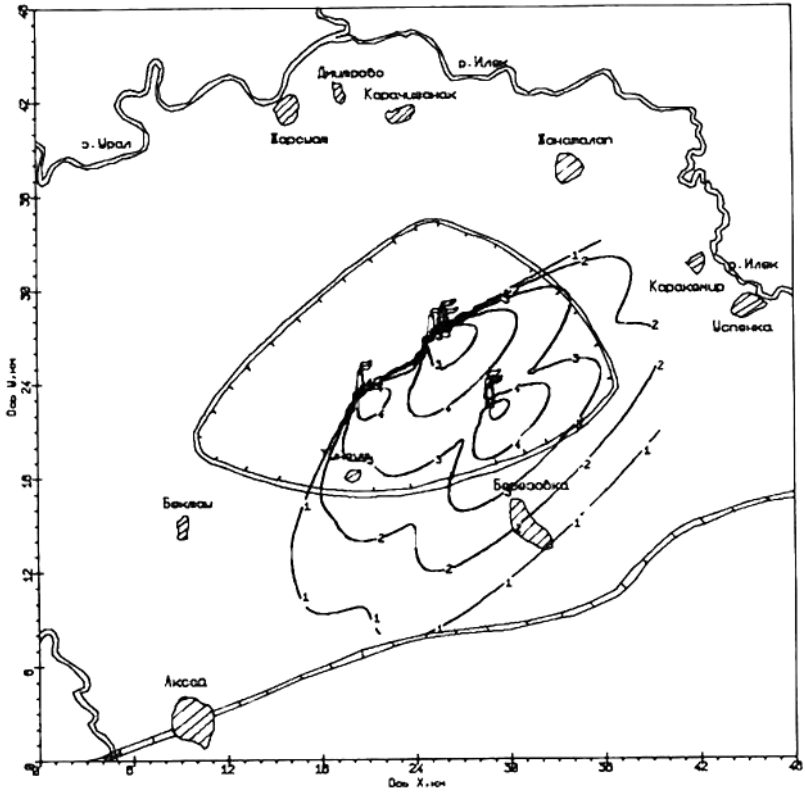


Рис. 46. Изолинии распределения концентрации CO_2 на высоте 10 м (вариант № 1, табл. 3)

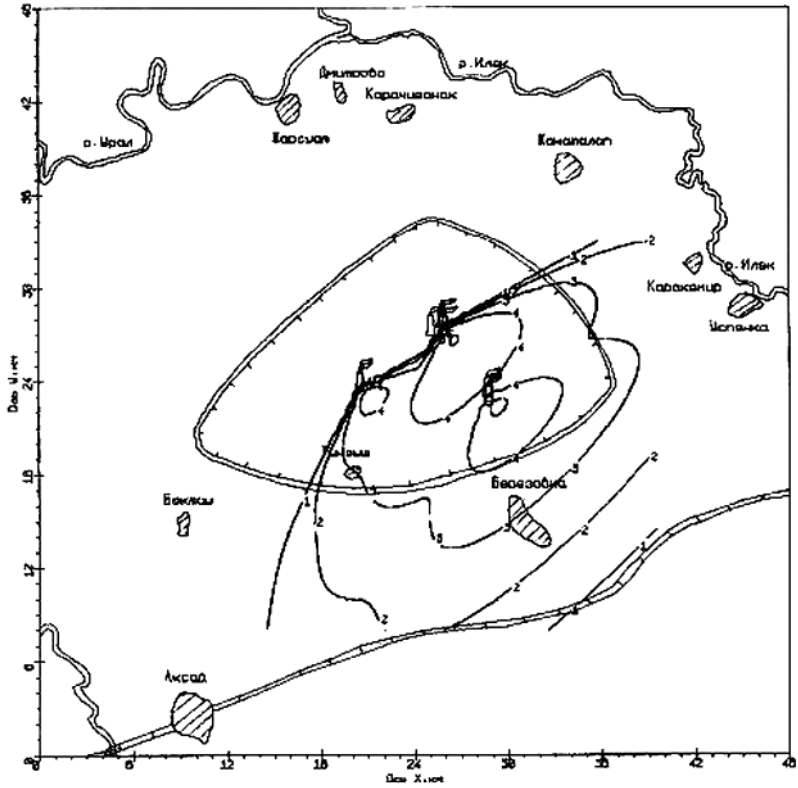


Рис. 47. Изолинии распределения концентрации CO_2 на высоте 100 м (вариант № 2, табл. 43)

Изолинии, соответствующие ПДК, достигаются при $K = 7$, но таких изолиний на рисунке нет, вследствие выбранных условий расчета.

Анализ результатов вычисления. Группа рисунков (рис. 46–53) изолинии реализует вариант с различными уровнями наблюдения ($Z_1 = 10$ м, $Z_2 = 100$ м). В верхних слоях атмосферы с увеличением высоты увеличивается скорость ветра (см. (6.8)) и увеличивается размер вихрей, обслуживающих турбулентный обмен, что приводит к большому распространению загрязняющих примесей. Как уже указывалось, в силу поставленных условий расчета, выделить изолинии уровня единиц ПДК нет возможности (уровень 7). Может вызвать удивление сравнение рис. 46 и 48 для аналогичных условий (меняется только скорость ветра, для рис. 48 скорость ветра в 2 раза меньше) – размывание на рис. 48 больше, чем на рис. 46, хотя ветер

меньше. Но изучение табл. 43 проясняет ситуацию – группа важных по вкладу в загрязнения источников 4–6 в четыре раза увеличила свою эффективную высоту, что и послужило более далекому распространению примесей.

Аналогичные рассуждения можно привести и к случаю неустойчивой атмосферы (рис. 54). Различие двух групп рисунков (устойчивой и неустойчивой атмосферы) обусловлено более высоким подъемом и дальним переносом примеси в случае конвекции, что приводит к более сжатым изолиниям в случае неустойчивой атмосферы на высоте z = 10 м и большим различием на высоте z = 100 м.

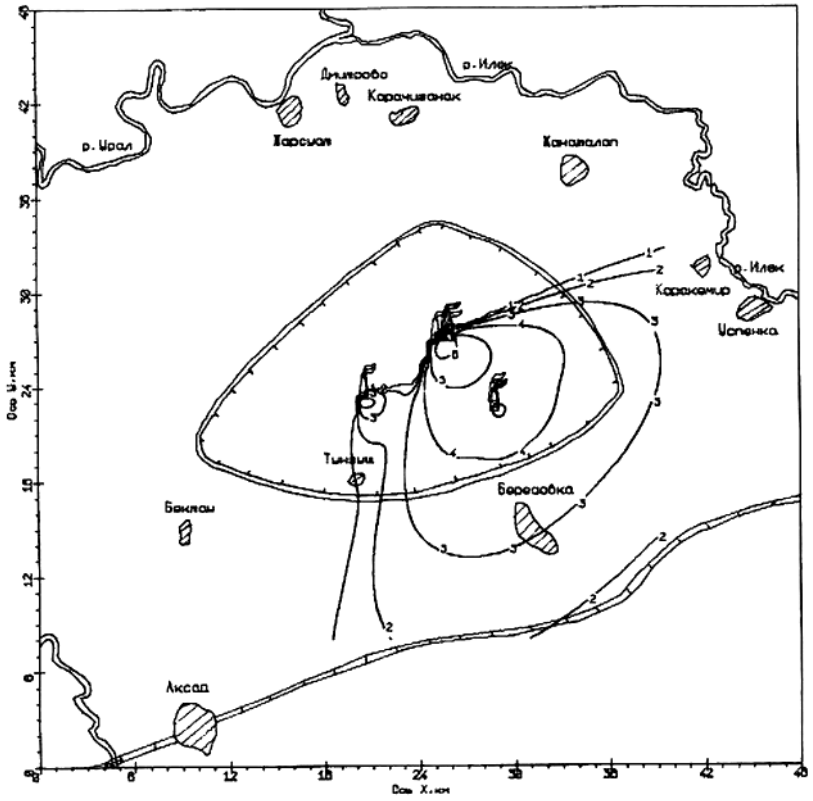


Рис. 48. Изолинии распределения концентрации CO_2 на высоте 10 м (вариант № 3, табл. 43)

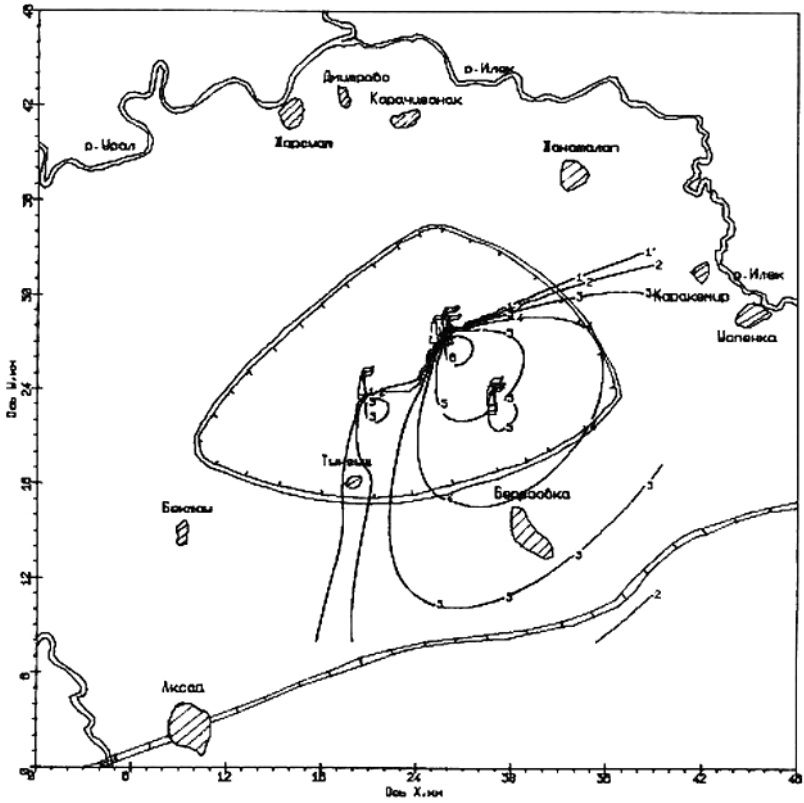


Рис. 49. Изолинии распределения концентрации CO_2 *на* высоте 100 м (вариант № 4, табл. 43)

6.2. Разработка методов коррекции, управления и прогнозирования экологической ситуацией района технополиса

6.2.1. Построение геоэкологической карты распространения примесей с применением гидродинамической модели пограничного слоя атмосферы и его результаты

С ростом числа и мощности нефтегазодобывающих месторождений резко возрастает опасность того, что концентрация вредных веществ, поступающих в нижние слои атмосферы, может превышать предельно допустимые величины. Совершенно очевидно, что степень загрязнения нижних слоев атмосферы зависит не только от технологических и конструктивных параметров промышленных

объектов (таких, как мощность выброса, высота и диаметр труб, скорость переноса и температура выбрасываемых в воздух веществ и др.), но и от тех факторов, которые определяют процесс распространения примесей в атмосфере. Этими факторами являются скорость ветра, стратификация атмосферы, орография местности и характер подстилающей поверхности. Они обусловливают скорость переноса вредных веществ вдоль направления среднего ветра и интенсивность турбулентного перемешивания. Приступая непосредственно к рассмотрению процессов распространения примесей, следует иметь в виду, что в подавляющем большинстве интересующих нас случаев они протекают в пределах пограничного слоя атмосферы. Поэтому представление о структуре последнего, в частности о динамике пограничного слоя и уравнения переноса и диффузии примеси, которые были изложены в первом подразделе третьего раздела лежат в основе излагаемых ниже численных расчетов.

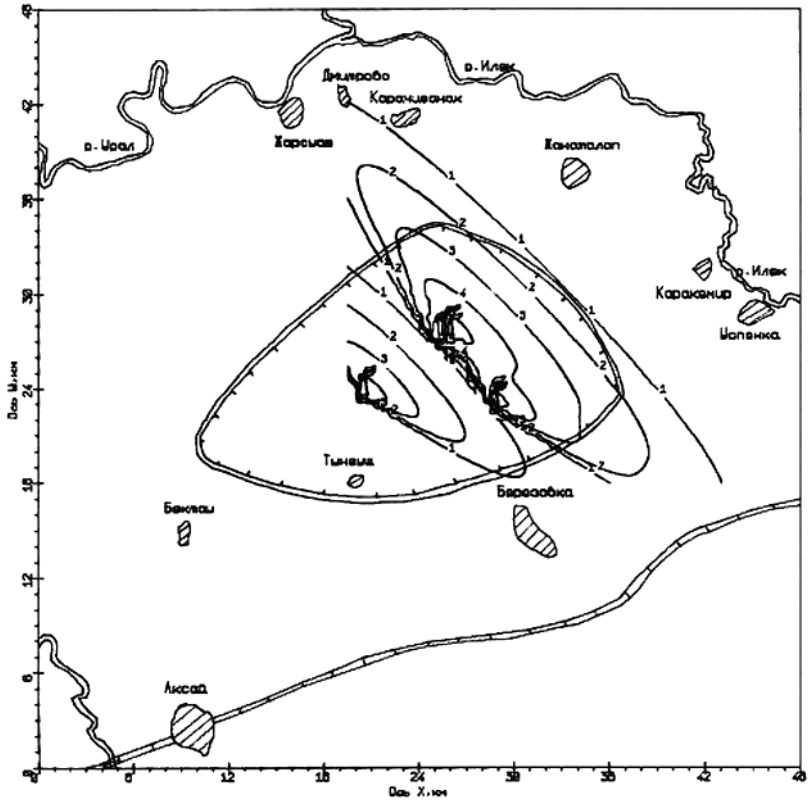


Рис. 50. Изолинии распределения концентрации CO_2 на высоте 10 м (вариант № 5, табл. 43)

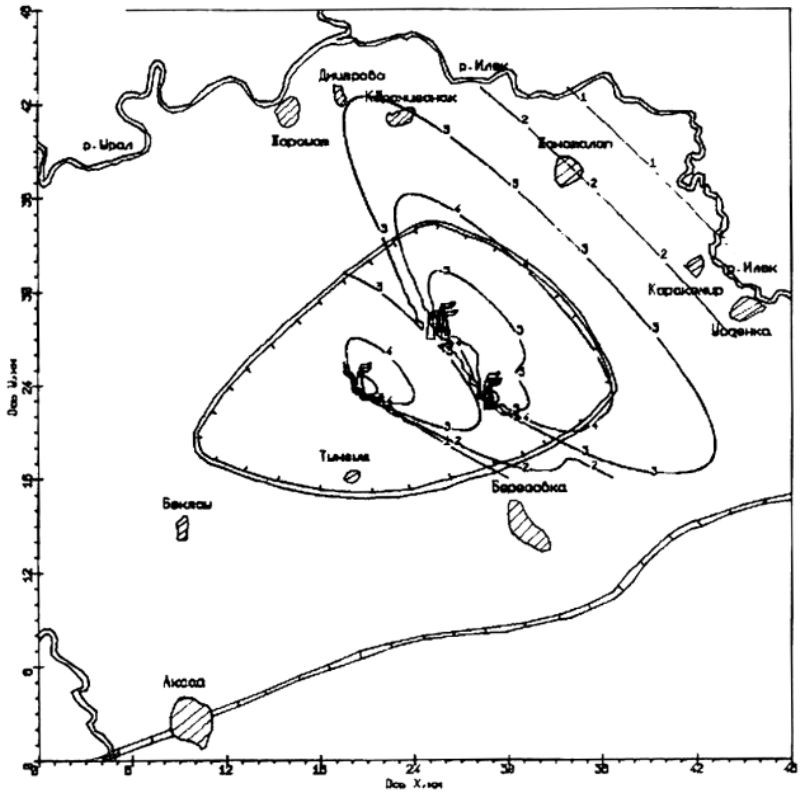


Рис. 51. Изолинии распределения концентрации CO_2 на высоте 100 м (вариант №6, табл. 43)

Построение геоэкологической карты переноса примесей используя модель пограничного слоя атмосферы с незакрепленной верхней границей воздушной массы. В атмосфере часто наблюдаются инверсионные ситуации, когда более теплая воздушная масса находится выше холодной. Эти воздушные массы отделяются свободной поверхностью $H(x, y, t)$, которая является искомой величиной. При этом можно предположить, что высота пограничного слоя атмосферы совпадает с нижней границей инверсии.

В отличие от постановки задачи пограничного слоя, где обычно верхняя граница имеет фиксированную высоту, в этом случае функция $H(x, y, t)$ является одной из искомых характеристик. Поэтому, использование такой модели требует

преобразования системы уравнений гидротермодинамики (3.17)–(3.23) таким образом, чтобы в ходе решения задачи, наряду с другими метеоэлементами, определить функцию $H(x, y, t)$ и одновременно учитывать структуру рельефа подстилающей поверхности.

Расчеты были проведены для наиболее аномальных метеоситуаций, т.е. когда в атмосфере преобладала конвекция, способствующая рассеиванию примесей, либо сильная инверсия при которых может происходить накопления вредных веществ превышающих предельно – допустимые концентрации (ПДК). Во всех проведенных вариантах расчетов предполагалось, что примесь является однокомпонентной и пассивной.

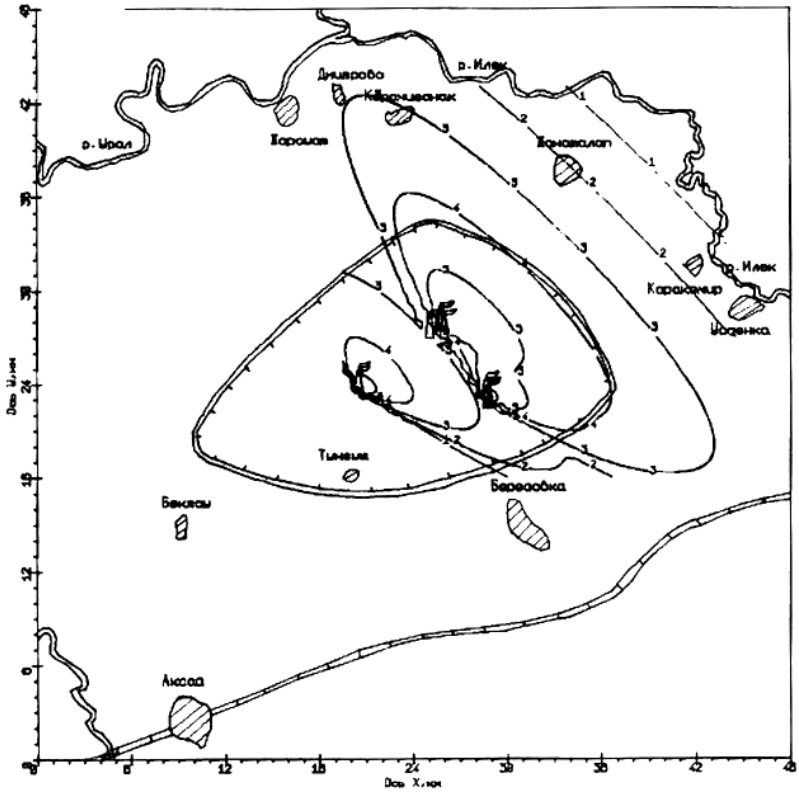


Рис. 52. Изолинии распределения концентрации CO_2 на высоте 10 м (вариант № 7, табл. 43)

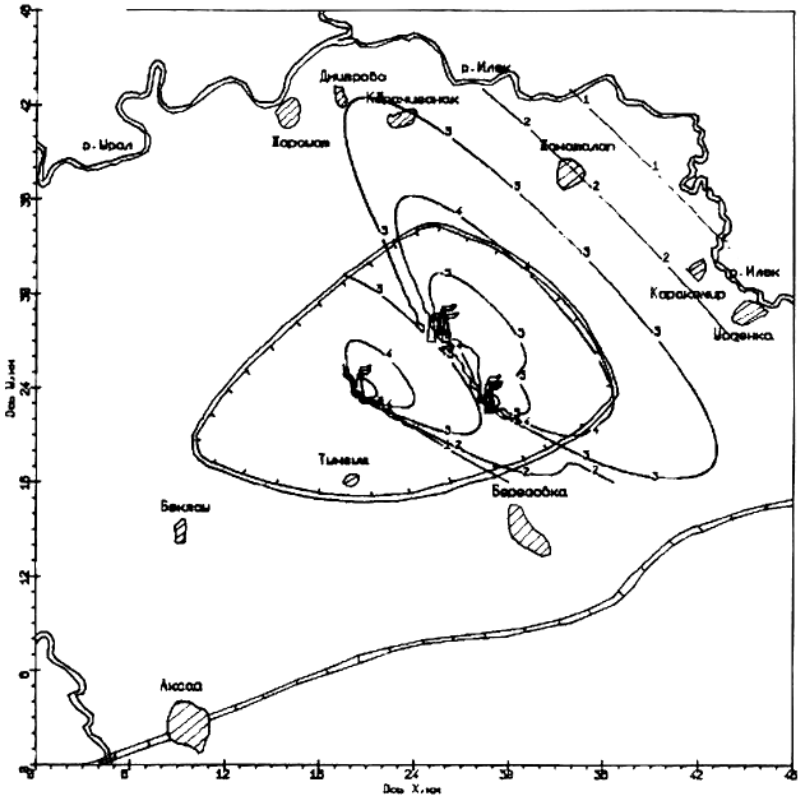


Рис. 53. Изолинии распределения концентрации CO_2 на высоте 100 м (вариант № 8, табл. 43)

Эффективная высота источников равнялась в среднем 50 м. При этом под высотой понимается сумма геометрической высотой трубы H и некоторой добавочной высоты. Последняя определяется подъемом облака примеси над срезом трубы, который обусловлен наличием первоначального количества движения в струе выходящих из трубы газов и их перегревом по отношению к атмосферному воздуху. Кроме того, расчеты приводились для двух компонентов выброса – двуокись азота (NO_2) и сернистого газа (SO_2), при этом их скорость оседания определялась по формуле Стокса.

Фоновая метеоситуация выбрана исходя из данных аэрологической станции и срочных наблюдений. Фоновая стратификация атмосферы определялась по среднесуточным градиентом температуры по вертикали до уровня 850 Мб.

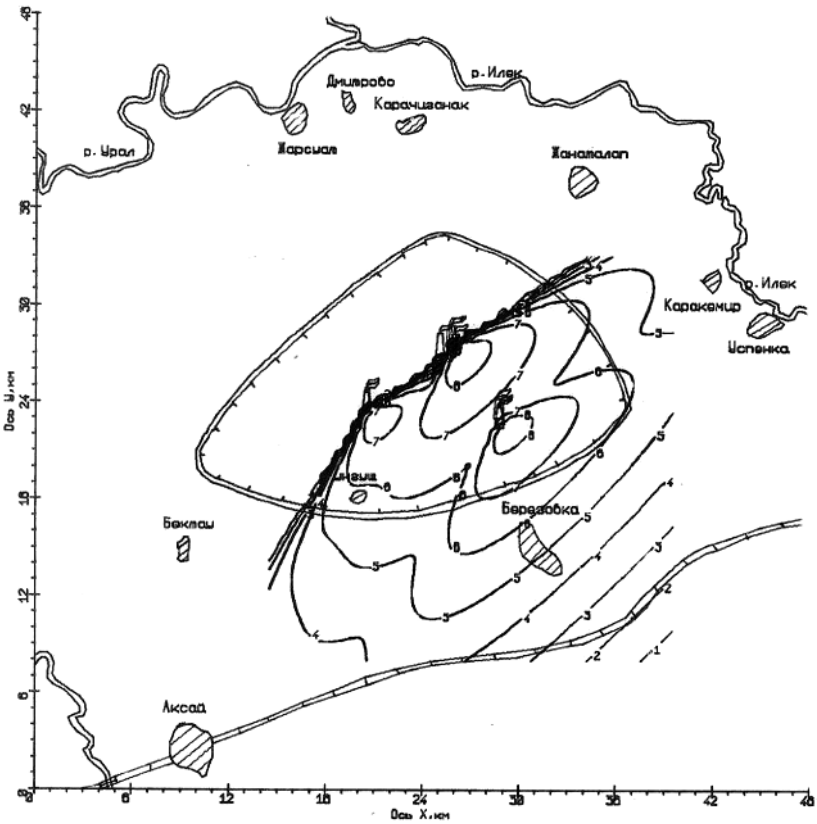


Рис. 54. Изолинии распределения концентрации NO_2 на высоте 10 м (вариант № 1, табл. 43)

Во всех вариантах начало счета соответствует 6.00 часам местного времени. Кроме того, для модели пограничного слоя атмосферы соответствуют следующие параметры:

$\Delta X = \Delta Y = 2000$ м; $H^0(x, y) = 1500$ м; $\Delta T = 1/18$; $\lambda = 0{,}035$ м/(с·град);

$l = 0{,}0001$ м$^{-1}$; $s = 0{,}003–0{,}007$ град/м; $z_0 = 0{,}01–0{,}615$ м; $A = 0{,}14–0{,}4$;

$L_w = 536$ кал/г; $\lambda_s = 0{,}31–0{,}94$ кал/(м·с·град); $g = 9{,}8$ м^2; $a_3 = 0{,}49$;

$b_3 = –0{,}08$; $\chi = 0{,}35$; $\rho = 1300$ г/м^3; $p = 1013$ мб; $C_p = 0{,}24$ кал/(г·град);

$\mu_x = \mu_y = 3000$ м^2/с; $\nu_z = 10$ м^2/с.

Теперь рассмотрим несколько вариантов выполненных расчетов, проведенных по гидродинамической модели рассеивания примесей в приземно – пограничном слое атмосферы в районе Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения. Для этого была выбрана область размером 48 м^2, таким образом, чтобы примерно в середине расположились источники, и в последующем этот район был покрыт сеткой шагом 2000 м.

Таким образом, расчеты выполнялись на сетке $24\times24 \approx 18$. Во всех случаях режим работы источников предполагался стационарным, т.е. $Q(t) = Q_0 = \text{const}$. Шаг интегрирования по времени $\Delta t = 10$ мин.

Вариант 1. В этом случае рассматривается распределение концентрации двуокиси азота (NO_2) при фоновом ветре (юго-западного направления) $U_g = -2{,}8$; $V_q = 0{,}74$ м/с для летного времени года (3.08.89), основные параметры атмосферы были такие: $T_{\text{воз}} = 298\,°\text{K}$, $P = 748$ мб, $e = 13$ мб.

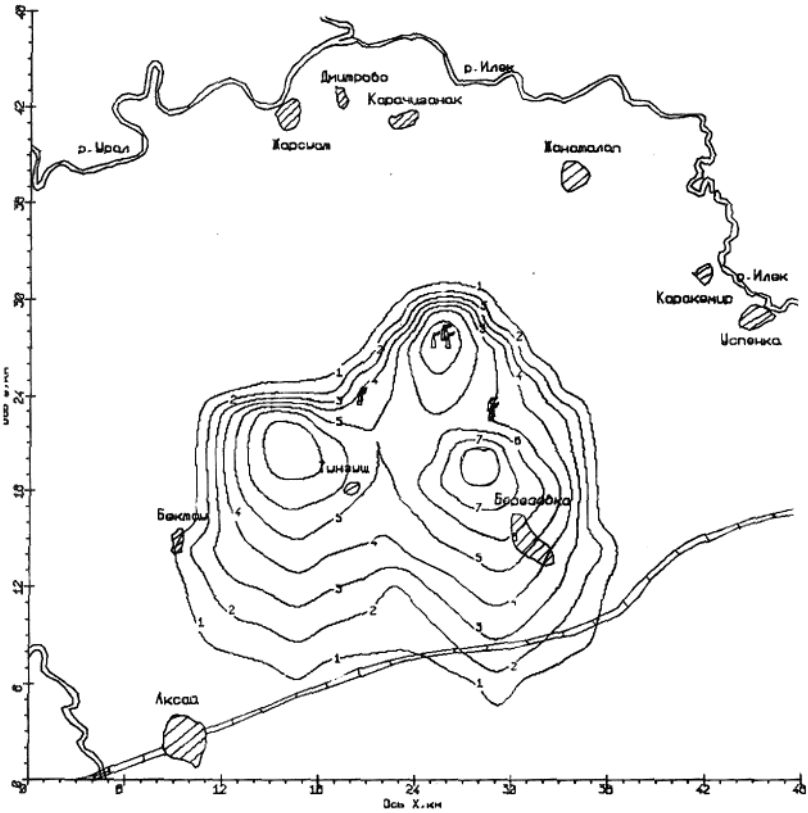


Рис. 55. Изолинии концентрации сернистого газа на уровне $Z = 2$ м в момент времени $t = 16$ ч 00 мин

В силу отсутствия информации о суточном ходе ветра, оно предполагалось независящим от времени.

На рис. 55 показаны изолинии распределения концентрации двуокиси азота в районе месторождения. На уровне $Z = 2$ м, в момент времени $t = 16.00$ ч. Отсюда видно, что наибольшие значения концентрации ограничиваются изолинией с номером 5, которой соответствует значение концентрации 0,075 мг/м^2.

Из результатов расчета следует, что максимум концентрации NO_2 находится приблизительно вблизи источников, где его значение достигает 0,23 мг/м^3. При таких метеоситуациях, в опасные зоны попадают районы с. Тунгуш и с. Березовка и частично охватывается с малой дозой, превышающий ПДК, с. Бестау.

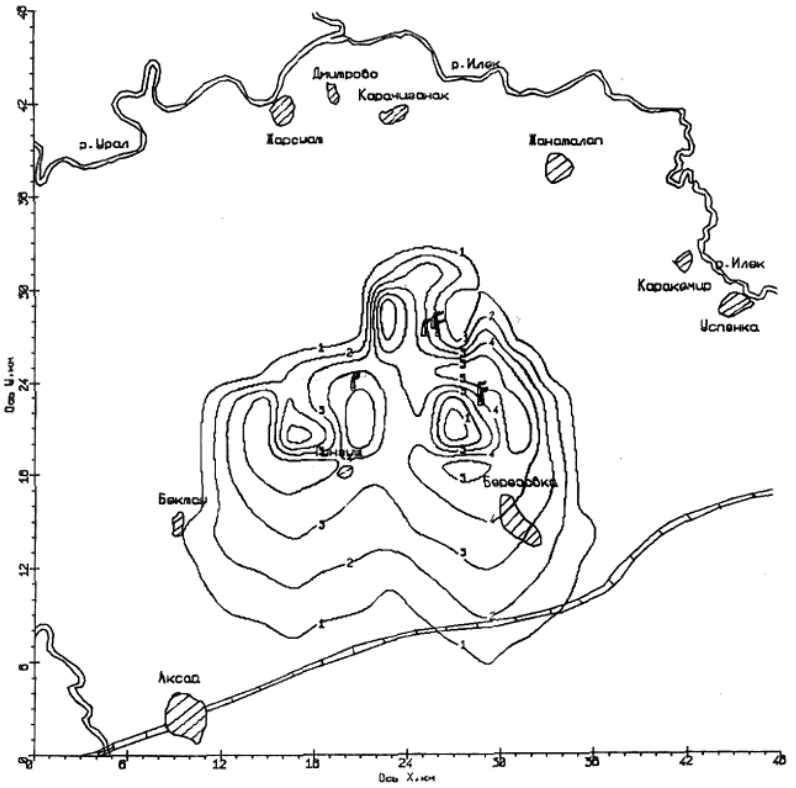


Рис. 56. Изолинии концентрации сернистого газа на уровне $Z = 2$ м в момент времени $t = 7$ ч 00 мин

Рис. 56 соответствует моменту времени, когда инверсия, образованная вследствие рационального выхолаживания начинает постепенно подниматься и имеет приподнятый вид (запрещающая инверсия). В этом случае в приземном слое

наблюдаются наибольшие значения концентрации примеси, которая по прежнему выпадает вблизи источников. А район, где ожидается превышение ПДК ограничивается изолинией с номером 4, которому соответствует значение концентрации 0,14 мг/м^3. Отсюда можно сделать вывод, что при приподнятых инверсиях опасность загрязнения намного возрастает, а область превышения ПДК сужается. Это можно объяснить ослаблением турбулентного перемешения в атмосфере.

Вариант 2. В данном случае рассматривается результат численного моделирования рассеяния сернистого газа в условиях зимы. Фоновые характеристики для модели заимствованы из результатов реальных наблюдений. В качестве фонового потока считать ветер на уровне 850 мб со значением U_q = 5,1 м/с; V_q = 3,1 м/с.

На рис. 57 показаны изолинии распределения концентрации сернистого газа (SO_2) на уровне Z = 2 м в момент времени t = 16.00 ч. Отсюда следует, что концентрация в основном локализована в окрестности источников. Но в этом случае почти не наблюдается зона превышающая ПДК. Наибольшее значение, соответствующее изолинии с номером 7 является 0,0071 мг/м^3.

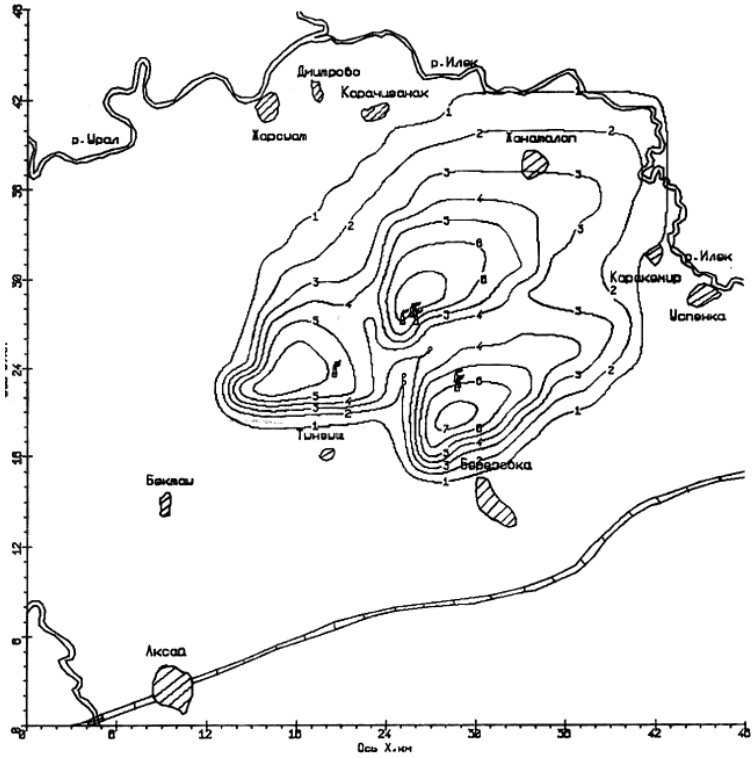


Рис. 57. Изолинии концентрации сернистого газа на уровне Z = 2 м в момент времени t = 16 ч 00 мин

А теперь рассмотрим изолинии концентрации на уровне источника. В этом случае происходит накопление концентрации NO_2 в плоскости $z = 50$ м, где наблюдаются зоны, в которых примесь превышает нескольких десятков ПДК. Этот случай является типичным для высотных источников, когда в приземном слое устанавливается устойчивая инверсия температуры, вследствие радиационного выхолаживания. В данном варианте по модели были рассчитаны следующие характеристики метеоэлементов температуры почвы –27 °С, температура воздуха на уровнях $z = 2$ м и $z = 50$ м и соответственно –18 °С и –12 °С. Отсюда можно сделать вывод, что при сильных инверсионных ситуациях, в приземном слое атмосферы маловероятно образование зоны с повышенным содержанием концентрации SO_2. Зоны, где наблюдается превышения ПДК ожидаются на уровне эффективной высоты источников.

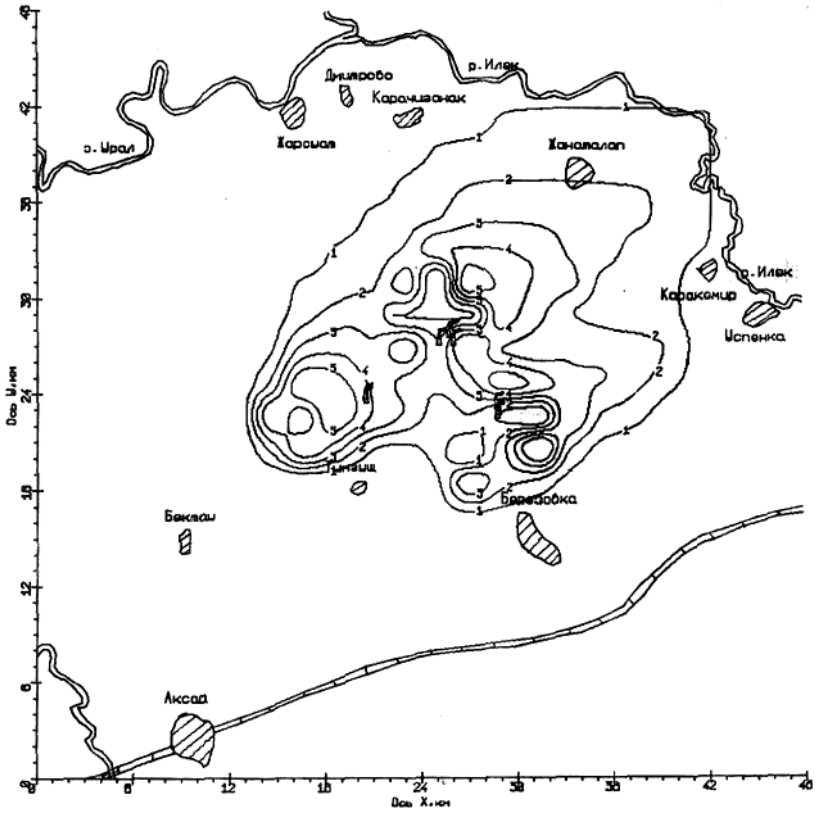


Рис. 58. Изолинии концентрации сернистого газа на уровне $Z = 50$ м в момент времени $t = 16$ ч 00 мин

Вариант 3. Теперь рассмотрим распределения для соединений двуокиси азота NO_2. В этом варианте метеоситуация соответствовала зимнему времени года (06.01.89). $T_{воз} = -25\,°C$, $m = 2{,}0$ м/с, $p = 757{,}2$ мб. Фоновый градиент температуры характеризуется следующим распределением: до 100 м стратификация сильно устойчивая, а выше слабоустойчивая. Отсюда видно, что газ в основном локализуется в окрестности трубы и это распределение в течение дня почти не меняется. А в нижних слоях и около земли наблюдается концентрация его в количестве, не превышающем ПДК. Надо отметить, что на уровне трубы наблюдается концентрация, превышающая ПДК в 300–350 раз. На рис. 58 этому соответствуют изолинии 8, 7, 6.

Вариант 4. В данном случае рассмотрим распределение концентрации SO_2 в случае приподнятой инверсии, соответствующей зимнему времени года (21.01.89) (рис. 59). В этом случае нижняя граница инверсии немного выше, чем высота источника (уходящая инверсия). Естественно, что такое состояние атмосферы в реальных условиях существует только лишь в некоторых отрезках суток (например, ближе к полудню).

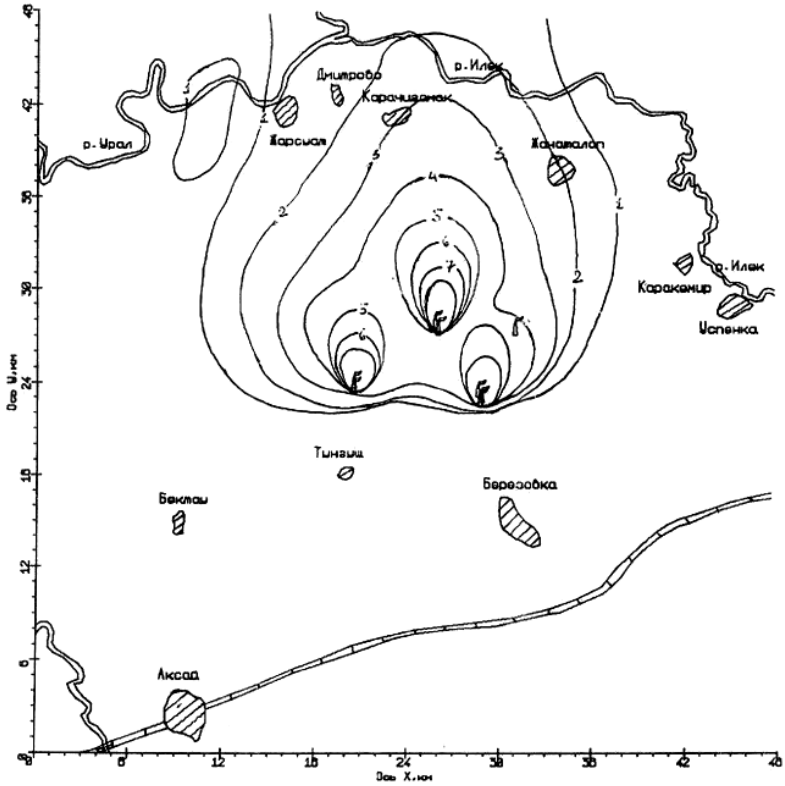


Рис. 59. Изолинии концентрации сернистого газа на уровне $Z = 2$ м в момент времени $t = 14$ ч 00 мин

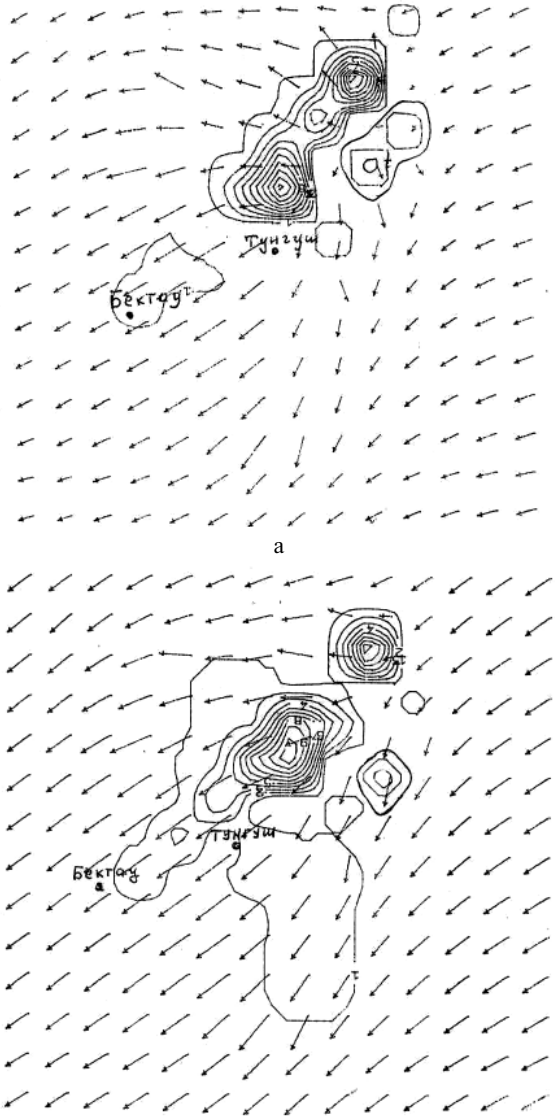


Рис. 60. Изолинии концентрации NO_2 *b* поле вектора скорости:
– на уровне Z = 50 м в момент времени *t* = 14 ч 00 мин;
б – на уровне Z = 2 м в момент времени *t* = 14 ч 00 мин

На рис. 60, а и б нанесены изолинии концентрации и вектора скорости на двух уровнях $Z = 50$ м и $Z = 2$ м для момента времени $t = 14{,}00$.

Видно, что, как и в варианте 2, происходит эффект «задымления» приземного слоя атмосферы. В этом случае выбросы имеют вид подинверсионный, т.е. распределение концентрации на обоих уровнях почти одинаковы. Например, на уровне $z = 50$ м максимальное значение (изолиния 8) равно 6,3 мг/м^3, а на уровне $z = 2$ м это значение равно 2,8 мг/м^3. А область с превышением ПДК ограничивается изолинией под номером 2.

Таким образом, гидродинамическая модель позволяет воспроизводить суточный режим метеополей и соответственно с ним, рассчитать распределение концентраций вредных примесей.

6.2.2. Прогнозирование экономического ущерба от загрязнения атмосферы

В практику экономических расчетов все чаще включается экологическая оценка различных технологических процессов. Одной из таких оценок, предлагаемых отечественными и зарубежными экономистами, является величина экологического ущерба, наносимого народному хозяйству загрязнением окружающей среды.

Включение величины экономического ущерба в традиционную систему экономических расчетов позволяют на новом уровне с учетом факторов окружающей среды обоснованно решать ряд хозяйственных задач: оценку экономической эффективности капитальных вложений и новой техники, выбор альтернативных вариантов развития технологий, материалов, природоохранных мероприятий, рациональное размещение производительных сил, стимулирование средозащитной деятельности, рационального использования природных ресурсов и др.

Под экономическим ущербом, наносимым окружающей среде, следует понимать выраженные в стоимостной форме фактические и возможные убытки, причиняемые различным подразделениям народного хозяйства загрязнением окружающей среды, а также дополнительные затраты на преодоление последствии этого загрязнения.

Экономический ущерб является стоимостным отражением отрицательных изменений в человеческом обществе, живой природе, объектах жизнедеятельности человека, которые происходят в результате загрязнения окружающей среды. Это прежде всего издержки, связанные с влиянием загрязнения на здоровье людей, дополнительные затраты на компенсацию интенсивного износа основных фондов, недопроизводство продукции сельского хозяйства и лесного хозяйства.

Единой мерой при оценке экономического ущерба, по мнению большинства исследователей, должно выступать количество рабочего времени или количество труда. В одном случае загрязнение окружающей среды приводит к прямой потере рабочего времени: невыход на работу из-за ухудшения здоровья части рабочих, к потерям части продукции сельского и лесного хозяйства, а также в промышленности (коррозия основных фондов). В другом случае потери носят косвенный характер: общество вынуждено отвлекать часть рабочей силы на ликвидацию или предотвращение последствий загрязнения. И наоборот, снижение экологической вредности технологического процесса позволяет уменьшить экономический ущерб либо отказаться от части затрат, связанных с защитой среды от загрязнения.

В основу определения ущерба по предлагаемым методикам обычно положены удельные ущербы, причиняемые при определенном уровне загрязнения атмосферы условной расчетной единицей расчетных факторов восприятия. Удельные ущербы позволяют учесть воздействие факторов влияния на величину экономического ущерба при определенном уровне факторов состояния. В общем виде расчет экономического ущерба при помощи удельных ущербов может быт выражен формулой:

$$Y_i = \sum_{i=1}^{n} Y_i\left(X_i\right)K_i, \tag{6.11}$$

где Y_1 – комплексный ущерб от загрязнения атмосферы; $Y_i(X_i)$ – величина i-го удельного локального ущерба при уровне загрязнения соответствующих факторов восприятия (X_i); K_i – размер факторов восприятия, соответствующих i-му локальному ущербу.

Удельные ущербы могут рассчитываться на единицу валовых выбросов в атмосферу, единицу приземных концентрации загрязнителей, единицу готовой продукции, единицу потребляемой энергии.

Прогнозирование факторов состояния, как указывалось выше, производится путем введения индексов факторов состояния по отдельным локальным ущербам. В частности, расчет индекса факторов состояния ущерба от ухудшения здоровья можно представить следующим образом:

$$I_j = K_{h.g}I_{h.g} + K_{\text{о.б}}I_{\text{о.б}} + K_mI_m,$$

где I_j – индекс факторов состояния исследуемого ущерба в j-м году по отношению к базовому году; $K_{h.g}$ – доля составляющей ущерба здравоохранения, связанная со снижением национального дохода на одного рабочего; $I_{h.g}$ – индекс изменения производства национального дохода на одного работающего; $K_{\text{о.б}}$ – доля составляющей ущерба, связанная с оплатой бюллетеней; $I_{\text{о.б}}$ – индекс изменения оплаты бюллетеней в течения одного дня на одного работающего; K_m – доля составляющей ущерба, связанная с медицинским обслуживанием; I_m – индекс изменения затрат на медицинское обслуживание на душу населения.

Индекс факторов состояния ущерба в коммунальном хозяйстве может быт выражен формулой:

$$I_k = K_jI_j + K_{\text{з}}I_{\text{з}} + K_{\text{Т}}I_{\text{Т}} + K_{\text{оз}}I_{\text{оз}} + K_{\text{б}}I_{\text{б}},$$

где I_k – индекс изменения нормативных экономических показателей ущерба жилищно-коммунального хозяйства в i-м году по отношению к базовому году; K_j – доля составляющей ущерба, связанная с содержанием объектов жилищного хозяйства города; I_j – индекс изменения стоимости объектов жилищного хозяйства города на одного городского жителя; $K_{\text{з}}$ – доля составляющей ущерба, связанная с содержанием элементов городского благоустройства, коммунального хозяйства и затратами по уборке городской территории; $I_{\text{з}}$ – индекс изменения стоимости объектов городского благоустройства и коммунального хозяйства; $K_{\text{Т}}$ – составляющая ущерба, связанная с содержанием городского общественного транспорта;

$I_т$ – индекс изменения роста городского общественного транспорта на одного городского жителя; $K_{оз}$ – доля составляющей ущерба, связанная с содержанием озеленения общественного пользования; $I_{оз}$ – индекс изменения озеленения городской территории на одного городского жителя; $K_б$ – доля составляющей ущерба, связанная с дополнительным бытовым обслуживанием населения (стирка, химчистка одежды); $I_б$ – индекс изменения бытового обслуживания на душу населения.

Аналогично рассчитываются индексы нормативных экологических показателей по остальным локальным ущербам. Использование индекса факторов состояния позволяет производить расчеты экономического ущерба как периода, предшествующего году получения удельных ущербов, та и на последующие годы.

Определение экономического ущерба от загрязнения атмосферы. Экономическая оценка ущерба, причиняемого газовыми выбросами в атмосферный воздух (Y), для всякого источника определяется по формуле:

$$Y = j\sigma f M,$$

где j – константа, численное значение которой принимается равным 16,8 тенге/усл. т.; σ – коэффициент, значение которого принимается равным 4; f – коэффициент, значение которого зависит от высоты источника и разности температур в устье источника и в окружающей среде (атмосфере), безразмерный; M – приведенная масса головного выброса загрязнения из источника в атмосферу, величина которой определяется по формуле:

$$M = \sum_{i=1}^{N} A_i m_1, \text{ усл. т/год},$$

где m_i – масса годового выброса примесей i-го вида в атмосферу, т/год; A_i – показатель относительной агрессивности примеси i-го вида, усл. т/год (табл. 42); N – общее число примесей, выбрасываемых источником в атмосферу.

Охрана воздушного бассейна. Анализ всех возможных источников вредных выбросов в атмосферу и самих выбросов показывает, что наибольшее загрязнение атмосферы вызывают залповые выбросы, связанные с продувкой скважин, остановкой оборудования УКПГ, ГПЗ, а также установки получения серы Клауса.

NO_2 и SO_2 дают максимальный вклад в валовые выбросы и определяют величину СЗЗ.

Все мероприятия направлены на уменьшение выбросов NO_2 *и* SO_2. К таким мероприятиям необходимо отнести:

1. Разработку новой технологии освоения скважин и мероприятии, позволяющих уменьшить выбросы по продувке скважин в 2 раза.

2. Строительство на ГПЗ установок доочистки отходящих газов включающих печи дожига и установки регенерации катализаторов, которые полностью исключают выбросы сероводорода в атмосферу от сероочистки ГПЗ и снижают более чем на 90 % выбросы.

3. Использование существующих и строительство новых подземных хранилищ для операции, связанных с опорожнением шлейфов, оборудования УКПГ газо- и конденсатопроводов и проведение продувок скважин сводит до минимума залповые выбросы.

4. Разработку и применение регулируемого электропривода мощностью 18–29 МВТ для компрессоров Сайклинг-процесса УКПГ-16/500 полностью ликвидирует выбросы окислов азота от нагнетательных компрессорных станции, которые составляют 90 % от валовых выбросов.

Экономическая эффективность природоохранных мероприятий. Эффект природоохранных мероприятий проявляется при различных уровнях:

1. Первичный эффект заключается в снижении отрицательного воздействия на окружающую среду и проявляется в снижении объемов загрязнении и концентраций. Для условий строительства – эксплуатации КНГКМ – это достижение ПДК для воздушной и водной среды.

2. Конечный социально-экономический эффект заключается в повышении уровня жизни населения, улучшении условий труда и отдыха, поддержании экономического равновесия.

3. Главный экономический эффект заключается в экономии или предотвращении потерь живого или овеществленного труда. На народнохозяйственном уровне он проявляется в форме предотвращения ущерба.

Расчет предотвращенного ущерба воздушной среде в результате осуществления мероприятий по снижению возможных выбросов в атмосферу приведен в таблице. Предотвращенный ущерб в результате водоохранных мероприятий (ВУ) определен по формуле:

$$У = j \cdot \sigma_к \cdot (M_1 - M_2) \text{ млн тенге},$$

где j – константа, значение которой принимается равным 400 тенге/ус. т; $\sigma_к$ – коэффициент, принимаемый равным 2,7; M_1–M_2 – приведенные массы загрязнении до и после проведения природоохранных мероприятий:

$$У = 400 \cdot 2{,}7 \cdot (47595{,}04 - 4826{,}86) = 4618{,}96 \text{ млн тенге/год}.$$

Следует заметить, что в настоящее время разрабатываются новые нормативы для расчета ущербов, наносимых природной среде деятельностью промпредприятий, которые внесут существенные изменения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Отчет «Математическое моделирование распространения загрязняющих веществ в регионе Карачаганакского газоконденсатного месторождения»: Сводный отчет. – Науч. рук. А.Айдосов. – Алматы, 1992.

2. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С., Баямирова Р.О. Анализ и инициализация исходной метеоинформации и параметров источников выбросов вредных веществ // Материалы II Каз.-Рос. науч.-практ. конф. «Математическое моделирование научно-технических и экологических проблем в нефтегазодобывающей промышленности» (24–25 сентября 1998г.). – Алматы, 1998. – С. 23-24.

3. Айдосов А.А., Заурбекова Н.Д. Анализ и инициализация исходной метеоинформации параметров выбросов источников веществ Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения // Тр. Междунар. симпоз., посвящ. 100-летию со дня рождения К.И. Сатпаева (7–8 апреля 1999 г.) «Академик К.И. Сатпаев и его роль в развитии науки, образования и индустрии в Казахстане». Ч. 1. – Алматы, 1999. – С. 212-215.

4. Айдосов А.А. Медико-демографическая ситуация в городах Павлодарской области и ее обусловленность влиянием атмосферной загрязненности // Тр. V Междунар. науч.-техн. конф. «Новое в охране труда, окружающей среде и защите человека в чрезвычайных ситуациях». Ч. 2. – Алматы, 2002. – С. 37-41.

5. Айдосов А., Айдосова А.А., Жакашев Н.Ж., Дюсенова Ж.А. Анализ климатических и метеорологических особенностей Павлодарской области для описания загрязнения окружающей среды. Ч. 1. // Тр. V Междунар. науч.-технич. конф. «Новое в охране труда, окружающей среде и защите человека в чрезвычайных ситуациях». Ч. 2. – Алматы, 2002. – С. 48-53.

6. Айдосов А., Айдосова А.А., Жакашев Н.Ж., Дюсенова Ж.А. Анализ климатических и метеорологических особенностей Павлодарской области для описания загрязнения окружающей среды. Ч. 2. // Тр. V Междунар. науч.-техн. конф. «Новое в охране труда, окружающей среде и защите человека в чрезвычайных ситуациях». Ч. 2. – Алматы, 2002. – С. 53–60.

7. Айдосов А., Айдосова А.А., Жакашев Н.Ж., Дюсенова Ж.А. Показатели состояния здоровья городского населения Павлодарской области и их обусловленность влиянием атмосферного загрязнения. Ч. 1. // Тр. V Междунар. науч.-техн. конф. «Новое в охране труда, окружающей среде и защите человека в чрезвычайных ситуациях». Ч. 2. – Алматы, 2002. – С. 60-65.

8. Айдосов А., Айдосова А.А., Жакашев Н.Ж., Дюсенова Ж.А. Показатели состояния здоровья городского населения Павлодарской области и их обусловленность влиянием атмосферного загрязнения. Ч. 1. // Тр. V Междунар. науч.-техн. конф. «Новое в охране труда, окружающей среде и защите человека в чрезвычайных ситуациях». Ч.2. – Алматы, 2002. – С. 65–70.

9. Айдосов А., Айдосова А.А., Жакашев Н.Ж., Дюсенова Ж.А. Показатели состояния здоровья городского населения Павлодарской области и их обусловленность

влиянием атмосферного загрязнения. Ч. 1. // Тр. V Междунар. науч.-техн. конф. «Новое в охране труда, окружающей среде и защите человека в чрезвычайных ситуациях». Ч. 3. – Алматы, 2002. – С. 70-74.

10. Айдосов А., Айдосова А.А., Жакашев Н.Ж., Дюсенова Ж.А. Экологическая оценка влияния атмосферного загрязнения на состояние здоровья населения городов Павлодарской области // Тр. V Междунар. науч.-техн. конф. «Новое в охране труда, окружающей среде и защите человека в чрезвычайных ситуациях». Ч. 2. – Алматы, 2002. – С. 74-77.

11. Айдосов А.А., Азимбаев Е. Исследования процессов переноса загрязняющих примесей в атмосфере Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения // В кн.: Экология и охрана почв засушливых территорий Казахстана. – Алма-Ата, 1991.

12. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Численное моделирование загрязнения атмосферы в зависимости от метеорологических условий // Тез. докл. респ. науч. конф. «Современные проблемы алгоритмизации». – Ташкент, 1996.

13. Айдосов А.А. Моделирование нестационарных атмосферных процессов Западного Казахстана для выявления метеорологических параметров независимо от сезона года и прогнозирования синоптической ситуации, необходимых при расчете переноса вредных примесей, выделяемых от нефтегазодобывающих промыслов этого региона // Материалы докл. Каз.-Рос. науч.-практ. конф. «Математическое моделирование научно-технологических и экологических проблем в нефтегазодобывающей промышленности». – Алматы, 1997.

14. Айдосов А.А. Динамика вертикальных движений в облачной атмосфере // Тр. респ. конф. с участием иностр. ученых «Суюкликлар куп фазали аралашмалар ва туташ мухитларда тулкинларни таркалишларининг долзариб муаммолари» (Ташкент, 21–23 апреля 1999). – Ташкент, 1999. – С. 218–221.

15. Айдосов А.А. Основные уравнения движения реальной атмосферы с учетом ее неоднородности // Поиск: науч. жур. мин-ва науки и высш. образования РК. – Алматы, 1999. – № 3. – С. 210–218.

16. Айдосов А.А. Уравнения, описывающие баланс влаги, приток тепла в атмосфере и связанные с ними соотношения // Поиск: науч. жур. мин-ва науки и высш. образования РК. – Алматы, 1999. – № 4–5. – С. 112–119.

17. Айдосов А.А. Моделирование прогностического уравнения атмосферных процессов с учетом влияния влажности на изменение ее параметров // Поиск: науч. жур. мин-ва науки и высш. образования РК. – Алматы, 1999. – № 6. – С. 234–241.

18. Aidosov A.A., Zaurbekov N.S. Dissertating of Set of Equation of Dynamics of Atmosphere and Construction of Finite Difference Appoximation Proceedings of the second international conference in the republic of Kazakhstan the informative technologies and control. KazITC'99 (Dezember 6-10, 1999, Almaty, Kazakhstan. European Offise of Aerospace Research). – Almaty, 1999.

19. Айдосов А.А. Вывод уравнений для давления во влажной атмосфере с оценкой роли турбулентной диффузии и модели, определяющих изменение давления //Поиск: науч. жур. м-ва науки и высш. образования РК. – Алматы, 2000. – № 2. – С. 199-206.

20. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Моделирование численного анализа и прогноза аномалии атмосферных процессов с использованием новой информационной технологии // Докл. III Каз.-Рос. науч.-практ. конф. «Математическое моделирование научно-технических и экологических проблем в нефтегазодобывающей промышленности» (19–20 сентября 2000 г.). – Алматы, 2000. – С. 12–16.

21. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Моделирование вертикальных движений для прогнозирования атмосферных процессов // Тез. докл. III Каз.-Рос. науч.-практ. конф. «Математическое моделирование научно-технических и экологических проблем в нефтегазодобывающей промышленности» (19-20 сентября 2000 г.). – Алматы, 2000. – С. 16-20.

22. Айдосов А.А., Айдосов Г.А. Теоретические основы прогнозирования природных процессов и экологической обстановки окружающей среды // Теорет. основы прогнозирования атмосфер. процессов и эколог. обстановки окруж. среды. – Кн.1. – Алматы: Қазақ университеті, 2000. – 290 с.

23. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Моделирование циркуляции бароклинной атмосферы с учетом притока тепла и радиационного баланса для оценки экологической обстановки окружающей среды // Тез. докл. Междунар. науч. конф. «Проблемы математического моделирования и информационных технологий». – Бишкек, 2001. – С. 177-181.

24. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Моделирование циркуляции бароклинной атмосферы с учетом имитирующего горизонтальную макротурболентность для оценки экологической обстановки окружающей среды // Тез. докл. Междунар. науч. конф. «Проблемы математического моделирования и информационных технологий». – Бишкек, 2001. – С. 207–212.

25. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Моделирование циркуляции бароклинной атмосферы с учетом турбулентного обмена динамический, эффект орографии для оценки экологической обстановки окружающей среды // Материалы респ. конф. АН Респ. Узбекистан «Современные проблемы механики». – Ташкент, 2001.

26. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Моделирование циркуляции бароклинной атмосферы с учетом трения для оценки экологической обстановки окружающей среды // Материалы респ. конф. АН Респ. Узбекистан «Современные проблемы механики». – Ташкент, 2001.

27. Алоян А.Е. Негидростатические численные модели локальных атмосферных процессов: Препринт, № 479. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1984. – 41 с.

28. Амиров А.Д. Метод расчета полей влажности и температуры в задаче о кучевом облаке // Изв. АН СССР. Сер.: ФАО. – 1971. – (Т. 7)№ 7. – С. 223-230.

29. Андреев В., Панчев С. Динамика атмосферных термиков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 152 с.

30. Айдосов А.А. Динамика вертикальных движений в облачной атмосфере // Тр. респ. конф. с участием иностр. ученых «Суюкликлар куп фазали аралашмалар ва туташ мухитларда тулкинларни таркалишларининг долзариб муаммолари» (Ташкент, 21–23 апреля 1999). – Ташкент, 1999. – С. 218–221.

31. Айдосов А.А. Основные уравнения движения реальной атмосферы с учетом ее неоднородности // Поиск: науч. жур. мин-ва науки и высш. образования РК. – Алматы, 1999. – № 3. – С. 210–218.

32. Айдосов А.А. Уравнения, описывающие баланс влаги, приток тепла в атмосфере и связанные с ними соотношения // Поиск: науч. жур. мин-ва науки и высш. образования РК. – Алматы, 1999. – № 4–5. – С. 112–119.

33. Aidosov A.A., Zaurbekov N.S. Dissertating of Set of Equation of Dynamics of Atmosphere and Construction of Finite Difference Appoximation PROCEEDINGS of the second international conference in the republic of Kazakhstan the informative technologies and control. KazITC'99 (Dezember 6-10, 1999, Almaty, Kazakhstan. European Offise of Aerospace Research). – Almaty, 1999.

34. Айдосов А.А. Вывод уравнений для давления во влажной атмосфере с оценкой роли турбулентной диффузии и модели, определяющих изменение давления // Поиск: науч. жур. м-ва науки и высш. образования РК. – Алматы, 2000. – № 2. – С. 199-206.

35. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Моделирование численного анализа и прогноза аномалии атмосферных процессов с использованием новой информационной технологии // Докл. III Каз.-Рос. науч.-практ. конф. «Математическое моделирование научно-технических и экологических проблем в нефтегазодобывающей промышленности» (19-20 сентября 2000г.). – Алматы, 2000. – С. 12–16.

36. Айдосов А.А., Айдосов Г.А. Теоретические основы прогнозирования природных процессов и экологической обстановки окружающей среды // Теорет. основы прогнозирования атмосфер. процессов и эколог. обстановки окруж. среды. – Кн. 1. – Алматы: Қазақ университеті, 2000. – 290 с.

37. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Моделирование циркуляции бароклинной атмосферы с учетом притока тепла и радиационного баланса для оценки экологической обстановки окружающей среды // Тез. докл. Междунар. науч. конф. «Проблемы математического моделирования и информационных технологий». – Бишкек, 2001. – С. 177-181.

38. Алоян А.Е. Негидростатические численные модели локальных атмосферных процессов: Препринт, № 479. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1984. – 41 с.

39. Амиров А.Д. Метод расчета полей влажности и температуры в задаче о кучевом облаке // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. – 1971. – (Т.7) № 7. – С. 223-230.

40. Андреев В., Панчев С. Динамика атмосферных термиков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 152 с.

41. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Численная оценка экологической обстановки окружающей среды при реализации бароклинных схем для моделирования циркуляции атмосферы //Тр. Междунар. конф. «Математическое моделирование механических систем и физических процессов». Ч.1. – Алматы, 2001. – С. 20–24.

42. Айдосов А.А. Модели экологической обстановки окружающей среды при циркуляции бароклинной атмосферы с учетом турбулентного обмена // Вестн. Инж. акад. РК. – 2001. – № (7)2. – С.66–73.

43. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Моделирование переноса вредных примесей в бароклинной атмосфере с применением основных уравнений гидротермодинамики и турбулентной термодиффузии // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Региональные проблемы экологии и безопасности жизнедеятельности». Ч. 1. – Алматы, 2002. – С. 69-75.

44. Айдосов А.А. Моделирование распространения вредных выбросов в пограничном слое атмосферы нефтегазоконденсатдобывающих регионов //

Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Региональные проблемы экологии и безопасности жизнедеятельности». Ч. 1. – Алматы, 2002. – С. 98–108.

45. Айдосов А. Комбинированная модель расчета концентрации от нестационарного непрерывного источника // Гидрометеорология и экология. – Алматы. – 2002. – № 3. – С. 7-15.

46. Ахмедов Б.Н., Закарин Э.А., Султангазин У.А. О постановке задачи переноса метеоэлементов в воздушном бассейне Алматы в двумерном приближении // В сб.: Дифференциальные уравнения и их приложения. – А., 1981. – С. 154-163.

47. Ахмедов Н.Д. Двумерная модель переноса загрязнения веществ в атмосфере // В сб.: Методы и средства математического моделирования нестационарных процессов. – А., 1985. – С. 66-99.

48. Ахмедов Н.Д. Трехслойная модель распространения примеси в воздушном бассейне города: № 94. Деп. в КазГосИНТИ. – 1994. – С. 15.

49. Комплексное исследование и оценка экологической обстановки Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения и разработка программы социально-экономического развития региона: гос. рег. № 0198РК00026, ГРНТИ87 87.26.25, инв. № 0298РК00097. – Науч. рук. А. Айдосов А. – Алматы, 1998.

50. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Теоретические основы прогнозирования природных процессов и экологической обстановки окружающей среды // Теорет. основы прогнозирования атмосфер. процессов, эколог. обстановки окруж. среды и построение геоэколог. карты на примере Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения. – Кн. 3. – Алматы: Қазақ университеті, 2000. – 220 с.

51. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Моделирования атмосферного загрязнения от ее циркуляции и метеорологических условий // Материалы I Респ. съезда по теорет. и прикл. механике. – Алматы, 1996. – С. 117-118

52. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Моделирование состояния загрязнения атмосферы для типовых циркуляций планетарного пограничного слоя региона Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения. Ч. 1: Модель загрязнения атмосферы // В сб.: Вестн. КазГУ. Сер.: математика, механика, информатика. – Алматы, 1996. – № 5. – С.29–38.

53. Айдосов А.А. Модельная оценка состояния загрязнения атмосферы в регионе Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения в зависимости от типов циркуляции планетарного пограничного слоя. // Тез. Междунар. конф. «Проблемы и перспективы развития науки и техники в области механики, геофизики, нефти, газа энергетики и химии Казахстана». – Актау, 1996. – С. 283.

54. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Расчет осаждения активных примесей при типовых атмосферных явлениях в регионе Карачаганакского нефтегазо-конденсатного месторождения // Материалы Междунар. конф. «Актуальные проблемы математики и математического моделирования экологических систем», посвящ. 60-летию акад. У.М. Султангазина. – Алматы, 1996. – С. 42.

55. Айдосов А.А. Принципы типизации атмосферных процессов // Материалы Междунар. конф., посвящ. 75-летию акад. НАН РК А.Т. Лукьянова. – Алматы, 1997. – С. 34.

56. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Расчет переноса примесей в атмосфере КНГКМ с использованием основных типов синоптической ситуации в Западном

Казахстане // Материалы Междунар. конф., посвящ. 75-летию акад. НАН РК А.Т. Лукьянова. – Алматы, 1997. – С. 36.

57. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Климатические особенности загрязнения атмосферы в регионе Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения // Межвуз. сб. науч. тр.: Нефть и газ / Под ред. Мусанова А.М. – Алматы, 1997. – С. 107-117.

58. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Моделирование состояния загрязнения атмосферы для типовой циркуляции планетарного пограничного слоя региона Карачаганакского нефтегазоконденсатного месторождения // Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Современные проблемы информатики, управления и создания информационных технологий и систем». Ч.1. – Алматы, 1998. – С. 71-73.

59. Каменецкий Е.С., Татаринов Е.Г. Расчет распространения загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы в условиях сложной подстилающей поверхности // Сиб. физ.-техн. журн. – 1992. – С. 121–125.

60. Зашихин М.Н., Канчан Я.С., Оникул Р.И. Об унификации расчетов загрязнения атмосферы от многих источников с помощью ЭВМ // Тр. ГГО, – Вып.325. – 1975. – С. 161–174.

61. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 448 с.

62. Берлянд М.Е. Состояние и пути совершенствования, нормирования, контроля и прогноза загрязнения атмосферы: Препринт, №59. – М.: АН СССР, ОВМ. – 50 с.

63. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 271 с.

64. Закарин Э.А., Крамар В.Ф., Нещадим В.М. Программный комплекс ТОПАЗ – системная модель загрязнения атмосферы города // Моделирование загрязнения атмосферы и его применение // Тез. Междунар. конф. ВМО. – Л., 1986. – С. 78-79.

65. Айдосов А.А. Численный анализ исходных параметров струи, истекающей из буровой скважины при аварии на КНГКМ // Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Современные проблемы информатики, управления и создания информационных технологий и систем» (Алматы, 8–10 января 1997). Ч. 1. – Алматы, 1997. – С. 69-71.

66. Айдосов А.А., Баймиров М. Укрупненная оценка экологического и экономического ущерба от загрязнения природной среды нефтегазо-добывающих промышленных регионов Казахстана. Павлодарское Прииртышье: история и современность // Материалы регион. науч. конф., посвящ. 60-летию Павлодарской обл. (10–11 декабря 1998г.). – Павлодар, 1998. – С. 37.

67. Айдосов А.А., Ежебеков М.А., Заурбеков Н.С. Расчет аварийных выбросов с использованием струйной модели // Материалы II Каз.-Рос. науч.-практ. конф. «Математическое моделирование научно-технических и экологических проблем в нефтегазодобывающей промышленности» (24–25 сентября 1998 г.). – Алматы, 1998. – С. 28–29.

68. Айдосов А.А. Численный анализ исходных данных и определение параметров струи, истекающей из буровой скважины при аварии на КНГКМ // Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Современные проблемы информатики,

управления и создания информационных технологии и систем». Ч. 1. – Алматы, 1998. – С. 69-71.

69. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С. Метеорологические условия и состояние загрязнения атмосферы в Карачаганакском нефтегазоконденсатном месторождении // Материалы респ. науч.-практ. конф. «Современные проблемы регионального управления экономикой Республики Казахстан». – Алматы, 2000. – С. 270–276.

70. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С., Тургамбаева К.С. Вывод уравнений блочной модели переноса вредных примесей в бароклинной атмосфере с использованием основных уравнений гидротермодинамики и турбулентной термодиффузии и описание взаимодействии между блоками // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Региональные проблемы экологии и безопасности жизнедеятельности». Ч. 1. – Алматы, 2002. – С. 75–80.

71. Айдосов А.А., Тургамбаева К.С. Построение численных систем уравнений блочной модели переноса вредных примесей в атмосфере и определение ее коэффициентов // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Региональные проблемы экологии и безопасности жизнедеятельности». Ч. 1. – Алматы, 2002. – С. 80-83

72. Айдосов А.А. Оценка влияния загрязнения на окружающую среду в районах нефтегазодобычи // В сб.: Ландшафтно-экологические основы природопользования и природоустройства. – Целиноград, 1991.

73. Aidosov A., Zaurbekov N. Dissertating of Set of Equation of Dynamics of Atmosphere and Construction of Finite Difference Appoximation. – PROCEEDINGS of the second in-ternational conference in the republic of Kazakhstan the informative technologies and control KazITC' 99, Dezember 6-10,1999 Almaty, Kazakhstan. European Offise of Aerospace Research and Developvtnt (EOARD). 141–144 pp.

74. Айдосов А., Заурбеков Н.С. Моделирование вертикальных движений для прогнозирования атмосферных процессов. – Доклады III традиционной Казахстанско-Российской научно-практической конференции «Математическое моделирование научно- технологических и экологических проблем в нефтегазодобывающей промышленности». – А., 2000. – С. 16-19.

75. Айдосов А., Заурбеков Н.С. Теоретические основы прогнозирования природных процессов и экологической обстановки окружающей среды. Книга 3. Теоретические основы прогнозирования атмосферных процессов, экологической обстановки окружающей среды и построение геоэкологической карты на примере КНГКМ. – А., Қазақ университеті, 2000. (монография). – 219 с.

76. Айдосов А., Заурбеков Н.С. Прогнозирование распространения сероводорода при аварийных выбросах в атмосферу. – Материалы международной научно-технической конференции «Новое в охране труда и окружающей среды», 11–12 окт. 2000, А., 2000. – С. 228–232.

77. Айдосов А., Заурбеков Н.С. Математическое моделирование процесса распространения вредных примесей в атмосфере при переменном профиле скорости ветра. – Материалы международной научно-технической конференции «Новое в охране труда и окружающей среды», 11–12 окт. 2000, А., 2000. – С. 232-235

78. Айдосов А., Айдосов Г.А., Заурбеков Н.С. Квазистационарное моделирование распространения вредных веществ в нижнем слое атмосферы. – Вестник ТарГУ им. М.Х. Дулати «Природопользование и проблемы антропосферы», №4 (24), 2006. – С. 13-22.

79. Айдосов А., Айдосов Г.А., Заурбеков Н.С. Моделирование распространения вредных веществ в нижнем слое атмосферы со свободной верхней границей воздушной массы и оценка экологической обстановки окружающей среды. – Промышленность Казахстана, № 1 (40), февраль 2007 г., Алматы, 2007. – С. 68-70.

80. Айдосов А., Айдосов Г.А., Заурбеков Н.С. Моделирование распространения газоаэрозольных вредных веществ в нижнем слое атмосферы и оценка экологической обстановки окружающей среды. – Ізденіс – ПОИСК. Серия естественных и технических наук. № 2/2007. Алматы, 2007 – С. 191–199.

81. Айдосов А., Айдосов Г.А., Данаев Н.Т., Заурбеков Н.С. Расчет рассеивания вредных веществ, содержащихся в продуктах сгорания газа на открытой факельной установке. – Вестник Казахского национального технического университета имени К.И.Сатпаева, № 2 (59), Алматы, 2007. – С. 51-57.

82. Айдосов А., Айдосов Г.А., Заурбеков Н.С. Современные экологические проблемы в нефтегазовой отрасли Республики Казахстан. – Известия Национальной Академии Наук Кыргызской Республики. 2007/2. Бишкек, Илим. – С. 125–129.

83. Айдосов А., Айдосов Г.А., Данаев Н.Т., Заурбеков Н.С. Математическая модель распространения монодисперсионной пассивной примеси в атмосфере. – Вычислительные технологии (Новосибирск). Том 13. Вестник КазНУ им. Аль-Фараби, серия математика, механика, информатика (Алматы). № 3 (58) (совместный выпуск). Часть 1. – Алматы – Новосибирск, 2008. – С. 104-110.

84. Айдосов А., Айдосов Г.А., Данаев Н.Т., Заурбеков Н.С. Математическое моделирование распространения промышленных выбросов в нижнем слое атмосферы. – Вычислительные технологии (Новосибирск). Том 13. Вестник КазНУ им. Аль-Фараби, серия математика, механика, информатика (Алматы). № 3 (58) (совместный выпуск). Часть 1. – Алматы – Новосибирск, 2008. – С. 111–119.

85. Айдосов А., Заурбеков Н.С., Саттарова С.С. Қарашығанақ мұнай-газ коденсаты кен орнындағы ауа ластануы және оның аймақтық климаттық сипаттамасына тәуелділігі. – III Рыскуловские чтения: «Бизнес, наука, образование: грани сотрудничества». Материалы международной научно-практической конференции. (19–23 мая 2008 г.). Алматы: Эверо, 2008. – С. 259-265.

86. Айдосов А., Заурбеков Н.С., Ахметова Г.М. Ауаға бөлінген зиянды қоспалардың атмосферада таралуының математикалық моделін құру жайлы. – III Рыскуловские чтения: «Бизнес, наука, образование: грани сотрудничества». Материалы международной научно- практической конференции. (19–23 мая 2008 г.). Алматы: Эверо, 2008. – С. 266-274.

87. Ларкин Н.А., Новиков А.В., Яненко Н.Н. Нелинейные уравнения переменного типа. – Новосибирск, 1983. – 200 с.

88. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. – Новосибирск: Наука, 1985. – 256 с.

89. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Гидрометеоиздат, 1988. – 414 с.

90. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. – Новосибирск: Наука, 1985. – 256 с.

91. Айдосов А., Ажиева Г.И., Заурбеков Н.С. Модельное обоснование загрязнения грунтов и грунтовых вод при авариях на нефтепроводах – Инновационные

и наукоемкие технологии в строительной индустрии. Сборник материалов международной научно-практической конференции. – А., 2009. – С. 141–147.

92. Айдосов А., Ажиева Г.И., Заурбеков Н.С. Воздействие на окружающую природную среду нефтетрубопроводов – Инновационные и наукоемкие технологии в строительной индустрии. Сборник материалов международной научно-практической конференции. – А., 2009. – С. 148–151.

93. Айдосов А., Айдосов Г.А., Заурбеков Н.С. Математические модели переноса и рассеивания вредных веществ в реальной атмосфере с учетом орографии земной поверхности и поле силы тяжести. – Труды международной конференции по распространению упругих и упругопластических волн, посвященной 100-летию со дня рождения Х.А.Рахматулина. – Бишкек, 2009. – С. 99-101.

94. Айдосов А., Айдосов Г.А., Заурбеков Н.С., Ажиева Г.И. Модельная оценка загрязнения атмосферного воздуха при испарении нефти в местах аварий. – Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. № 4 (59), 2009. – А., 2009 – С. 273-278.

95. Айдосов А.А., Айдосов Г.А., Заурбеков Н.С., Ажиева Г.И. «Исследование влияния выброса от передвижных источников НГДУ «Жайыкнефть» на загрязнения атмосферного воздуха региона» материалов конференции Франция (ПАРИЖ).

96. Айдосов А.А., Айдосов Г.А., Заурбеков Н.С., Ажиева Г.И. «Влияния выброса от стационарных источников НГДУ «Жайыкнефть» на степени загрязнения атмосферного воздуха региона» Материалы международных научных конференций «Актуальные проблемы образования Actual problems of education» 15–24 октября 2015г. Греция (Афины)

97 Aidosov A.A., Aidosov G.A., Azhieva G.I., Zaurbekov N.S., Zaurbekova N.D., Uazhanova R.U,, Admayeva A.M. «Integrated research pollution by harmful substances soil and water activities of the region ogm «Zhayikoil», Материалы международных научных конференций «Компьютерное моделирование в науке и технике Computer modeling in science and technology» ОАЭ (Дубай) 16–23 октября 2015 г. «International journal of experimental education» ISSN 1996–3947

98. Aidosov A.A., Azhieva G.I., Zaurbekov N.S., Zaurbekova N.D., Zaurbekova G.N., Uazhanova R.U. «Justification of the structure observation network environment of the oil and gas sector» Материалы международных научных конференций «III Международная научная конференция education and science without borders «Образование и наука без границ» 8–13 ноября 2015 г., Германия (Мюнхен)

99. Айдосов А.А., Заурбеков Н.С., Ажиева Г.И., Заурбекова Г. Н. «Исследование загрязнения вредными веществами почв и вод региона деятельности НГДУ «Жайыкнефть», журнал «Международный журнал экспериментального образования» № 11 2015, стр. 443–445.

100. A. Aidosov, G. A. Aidosov, N.S.Zaurbekov, L.K. Baibolova, A.M. Admaeva, N. Dzh. Zaurbekova. The Estimation of Height of the Mouth of the River of Sources and Influence of Building of Industrial Facilities at the Modelling of Pollution of the Atmosphere by the Emissions. – Research Journal of Applied Sciences 10 (2). – Pakistan, 2015. – pp. 54–58. – ISSN: 1815–932X © Medwell Journals.

101. Айдосов А.А., Айдосов Г.А., Заурбеков Н.С., Заурбекова Н.Д. Модели прогноза изменений качества компонентов природной среды южных промышленных

регионов от техногенной нагрузки и их влияния на показателей изменения здоровья населения – Монография, ISBN 978-601–263-350–4. – Алматы, 2016. – 240 с.

102. Айдосов А.А., Айдосов Г.А., Заурбеков Н.С., Ажиева Г.И. Модельная оценка техногенной нагрузки компонентов природной среды нефтегазодобывающего региона – Алматы, 2015 (монография). – 160 с.

103. Айдосов А., Заурбеков Н.С., Заурбекова Н.Д., Абсаматова Қ.А. Атмосфераның жерүсті қабатындағы зиянды қоспаларды тасымалдаудың математикалық моделі – Вестник КазНПУ им. Абая, серия физико-математические науки, № 2 (54), Алматы, 2016. – С. 12–19.

104. Айдосов А., Заурбеков Н.С., Абсаматова Қ.А., Заурбекова Г.Н. Атмосфераның шекаралық қабатындағы ластаушы заттарды тасымалдау үрдісінің математикалық модельдеуін негіздеу – Вестник КазНПУ им. Абая, серия физико-математические науки, № 2 (54), Алматы, 2016. – С. 8–12.

105. Заурбекова Г.Н. Атмосфералық жағдайларды бір типке келтіру негізінде модель бойынша есептелген атмосфераның ластану топтары – Вестник КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, № 3 (115), Алматы, 2016 – С. 175–181.

106. Заурбекова Н.Д., Айдосов А.А., Заурбеков Н.С., Заурбекова Г.Н. Исследование воздействия на окружающую природную среду деятельности НГДУ «Жайыкнефть» – Вестник КазНТУ им. К.И. Сатпаева, № 4, Алматы, 2016 – С. 316–322.

107. Aidosov A.A., Aidosov G.A, Zaurbekov N.S., Azhieva G.I., Uazhanova R.U., Zaurbekova G.N. Determination of the effect of emissions from stationary sources of OGPD «Zhaiykneft» on atmospheric air pollution degree of the industrial region – Metallurgical and Mining Industry № 2 – 2016, Dnipropetrovsk, Ukraina, 2016. – 46-51 pp.

108. Aidosov A.A., Aidosov G.A, Zaurbekov N.S., Absamatova K.A., Zaurbekova G.N., Zaurbekov I.S. Mathematical modeling and numerical methods of atmospheric processes determining pollutants transfer at emergency emissions – Metallurgical and Mining Industry № 3 – 2016, Dnipropetrovsk, Ukraina, 2016. – 65–68 pp.

109. Zaurbekova G.N. Information system of region ecological monitoring in case of pollution of atmosphere by industrial emissions – Metallurgical and Mining Industry № 5 – 2016, Dnipropetrovsk, Ukraina, 2016. – 72-80 pp.

110. Allayarbek Aydosov, Baidaulet Urmashev and Gulzat Zaurbekova. Modeling the spread of harmful substances in the atmosphere at a variable velocity profile – Open Engineering formerly Central European Journal of Engineering, vol. 6, issue 1. ISSN 2391-5439. Warsaw, Poland, 2016. – 264–269 pp.

111. Aidosov A.A., Kizatova M.J., Azimova S.T., Zaurbekova G.N. Development of the Information System for Monitoring, Modelprediction of Changes in the Quality of the Environment and Public Health Indicators of Industrial Region, Studying the Anatomical Composition of Pumpkins from Useful Components of Flora for Human – International Journal Of Applied And Fundamental Research. – Neu-Isenburg, Germany, 2016. – № 2 – URL: www.science-sd.com/464–25076 (10.09.2016).

112. Айдосов А., Заурбеков Н.С. Модельные исследования заболеваемости населения от природных и социальных факторов по категориям значимости их влияния – Международный журнал экспериментального образования. – Москва, РФ, 2016. – № 9-1. – С. 109-112.

113. Айдосов А., Заурбеков Н.С. Исследования состояния окружающей среды в южных промышленных регионах от загрязнения почвы – Международный журнал экспериментального образования. – Москва, РФ, 2016. – № 9-1. – С. 118–121.

114. Айдосов А., Айдосов Г.А., Заурбеков Н.С. Определение экологических факторов для здоровья населения – Международный журнал экспериментального образования. – Москва, РФ, 2016. – № 9-1. – С. 130–134.

115. Айдосов А., Заурбеков Н.С. Исследование состояния окружающей среды в южных промышленных регионах от загрязнения вредными веществами хозяйственно-питьевой воды – Международный журнал экспериментального образования. – М., РФ, 2016. – № 9-1. – С. 136-141.

116. Заурбекова Г.Н. Моделирование загрязнения атмосферы промышленными выбросами – Металлургическая и горнорудная промышленность № 3 (300), 2016 – Днепропетровск, Украина, 2016. – С. 129-137.

117. Aidosov A.A., Azhieva G.I., Zaurbekov N.S., Zaurbekova N.D., Zaurbekova G.N., Uazhanova R.U. Justification of the Structure Observation Network Environment of the Oil and Gas Sector – International Journal of Applied and Fundamental Research. – Neu-Isenburg, Germany, 2015. – № 2 – 6 с. URL: www.science-sd.com/461–24844 (18.12.2015).

118. Айдосов А., Заурбеков Н.С. Методика количественного анализа, расчета экологической опасности и риска – Известия Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова /теоретический и прикладной научно-технический журнал. № 3 (39), часть 1. Бишкек, Кыргызская Республика, 2016 – С. 298-302 (Журнал входит в список ВАК Кыргызской Республики).

119. Айдосов А., Заурбеков Н.С. Исследование состояния окружающей среды промышленных регионов от загрязнения атмосферного воздуха – Известия Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова /теоретический и прикладной научно-технический журнал. № 3 (39), часть 1. Бишкек, Кыргызская Республика, 2016 – С. 303-313 (Журнал входит в список ВАК Кыргызской Республики).

120. Айдосов А., Заурбеков Н.С., Абсаматова Қ.А. Мұнай-газ өндіру жұмыстары нәтижесінде атмосфераға келтірілген экономикалық зардаптарды бағалау // Современный научный вестник. – Белгород, РФ, 2016. Т. 4. № 2. С. 122–124.

121. Aidossov A.A., Aidossov G.A., Danaev N.T., Zaurbekov N.S. Inverse equation for determination of anomalies field of gravity force by actual meteorological data – Abstracts of the International Conference «Computational and Informational Techologies in Scince, Enginiring and Education» (September 24–27, 2015) – Almaty: Қазақ университеті, 2015. – 103 pp.

122. Заурбекова Г.Н., Урмашев Б.А. Мониторинг и модельная оценка влияния выбросов в атмосферу промышленного региона на здоровье населения – Материалы XII МНПК «Современный научный потенциал – 2016», Science and Education Ltd, Шеффильд, Англия, 28.02–07.03.2016. vol. 18. Matematics. Modern information technologies. – 2016.- С. 13-14.

123. Айдосов А., Заурбеков Н.С., Заурбекова Г.Н., Абсаматова Қ.А. Жер үстіндегі атмосфера қабатында қоспалардың таралу үрдісін желдің айнымалы жылдамдығы кезінде модельдеу – Материалы XI МНПК «Научная мысль информационного века – 2016», 07.-15.03.2016, «Nauka I studi», Przemysl, Польша, 2016. – С. 17–20.

124. Айдосов А., Заурбеков Н.С., Абсаматова Қ.А. Өндірістік жұмыстар нәтижесінде атмосфераға келтірілген экономикалық зардаптарды бағалау – Материалы XI МНПК «Ключевые проблемы современной науки», 15–22 апреля 2016 г., София, Болгария, 2016.– С. 83-85.

125. Айдосов А., Заурбеков Н.С. Модели для оценки состояния и уровня загрязнения атмосферы – МНПК «Математические методы и современные космические технологии», посвященной 80-летию академика У.М. Султангазина (г. Алматы, 4–5 октября 2016 года). Тезисы докладов – Алматы, 2016. – С. 13-16.

126. Айдосов А.,, Заурбеков Н.С, Заурбекова Г.Н. Разработка методов оценки влияния вредных веществ на компоненты природных сред, учитывающих неблагоприятные погодные условия и орографию местности Сборник материалов межведомственной научно-практической конференции «Современное образование в Республике Казахстан: новые методыи технологии в организации образовательного процесса», Алматы, 2016. – С. 136-139.

127. А. Айдосов, Г.А. Айдосов, Н.С. Заурбеков, Теория и методы описания распространения естественных и антропогенных загрязнений при различных климатических условиях – Алматы, 2017, – 240 с. ISBN 978-601–263-385–6.

128. А. Айдосов, Г.Н.Заурбекова. Разработка информационной системы экологического мониторинга для оценки состояния компонентов природной среды промышленного региона – Алматы, 2017. – 240 с. – ISBN 978-601–263-379-5.

129. А.Айдосов, Н.С.Заурбеков. Модели и методы оценки влияния вредных веществ на компоненты природных сред – Алматы, 2016. – 252 с. – ISBN 978-601–263-380–1.

130. A. Aydosov, N.S. Zaurbekov, N. Zaurbekova, G., Zaurbekova, G. Ay-dosov, K. Imanba-yev, S. Zaurbekov. Numerical Realization of Mathematical Model of Transfer and Diffusion of Impurity in the Atmosphere Interface (10 March 2017, If Tr = 0,89). – Current Science. – Vol. 112. – № 5. – 1489-1499 pp.

131. A.Aydosov, G. Aydosov, N.S.Zaurbekov, N. Zaurbekova, I. Zaurbekov, A. Akzholova, B. Zaurbekov. Informational and Mathematical Modeling of The Impact of Emissions into the Atmosphere on Public Health IF (10 March 2017. Tr = 0,89). – Current Science. – Vol. 112. – № 5.– 1463-1472 pp.

132. A. Aydosov, G. Zau-rbekova, G. Aydosov, N.S.Zaurbekov, L. Baibolova, R. Aitbayeva, B. Talpakova Accidents with the Release of Pollutants into the Atmosphere and the Issues of their Mathematical and Informational Modeling and Numerical Simulation (10 March 2017. If Tr = 0,89). – Current Science. – Vol. 112. – № 5. – 1473-1488 pp.

133. А.Айдосов, Заурбеков Н.С., М.С.Кзылбаев, А.Е.Батырбаева Информационное обеспечение моделирования процесса переноса загрязняющих веществ в пограничном слое атмосферы Материалы республиканской научно-практической конференции молодых ученых «Наука. Образование. Молодежь», посв. 60-летию АТУ. – Алматы, 2017. – С. 143-145.

134. Айдосов А., Заурбеков Н.С., Кызылбаев М.С., Батырбаева А.Е. Информационное обеспечение моделирования процесса переноса загрязняющих веществ в атмосфере с целью экологического мониторинга окружающей среды. – Алматы, 2017. – Вестник АТУ. – Выпуск № 2 (115). – 4 с. – I SSN 2304-5681.

Приложение А

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

Введение

В нашей республике охрана окружающей среды отнесена к важнейшим политическим, экономическим и социальным задачам государства. В Конституции Республики Казахстан подчеркивается: «Государство ставит целью охрану окружающей среды, благоприятной для жизни и здоровья человека» [1].

В условиях рыночных отношений важное значение приобретают экономические методы управления экологическими проблемами, позволяющие эффективно использовать естественные богатства, снижать загрязнение окружающей природной среды.

Оценки экспертов Всемирного банка, других международных организаций, а также отечественных ученых и специалистов свидетельствуют о необходимости совершенствования системы экологической безопасности в Казахстане. Речь идет, в первую очередь, о проведении ее в соответствии как с требованиями неотложного улучшения экологической обстановки, так и с быстро меняющимися экономическими и социальными условиями развития республики в условиях рынка.

Новый экономический механизм природопользования должен стимулировать внедрение безотходных экологически чистых технологий, создавать заинтересованность в проведении природовосстановительных и природоохранных мероприятий, регулировать процесс размещения новых промышленных объектов в условиях твердых экологических ограничений. Для создания такого эффективного экономического механизма необходимо решение ряда задач:

– четкое разграничение источников финансирования и обеспечение необходимыми средствами природоохранных мероприятий как предприятий, так и регионов;

– создание эффективной системы платежей за предоставляемые природные ресурсы, выбросы (сбросы) загрязняющих веществ и размещение отходов в окружающей природной среде;

– формирование рынка экологических услуг, обеспечивающих финансирование и кредитование мероприятий по охране природы и рациональному использованию естественных богатств за счет предприятий-природопользователей и банковских кредитов.

Современный уровень научно-технического прогресса пока не в состоянии обеспечить безвредные производства, и поэтому решение экологических проблем преимущественно сводится к различным платежам по определению их ставок, которые должны возмещать ущерб, нанесенный природе и населению. К ним относятся платежи за пользование естественными ресурсами и лимиты их изъятия (потребления), за нормативный и сверхнормативный выбросы и сбросы в окружающую среду, за размещение твердых отходов.

Современное экологическое положение требует коренного изменения природоохранной политики государства. Основная суть ее заключается в том, что главным в нашей жизни является здоровье человека, охрана его от любого воздействия загрязнения. При таком подходе эталоном чистоты природы выступает отсутствие любой болезни от экологического нарушения, а ныне широко используемые нами нормируемые уровни содержания в окружающей среде веществ (ПДК, ПДВ, ПДС, ВСВ и т.п.) рассматриваются как вспомогательные показатели. В этом случае основным критерием хозяйственной деятельности является минимум ущерба человеку, его здоровью, а экономические подходы используются на следующей стадии, при отборе вариантов в рамках основного критерия.

Важным условием совершенствования хозяйствования механизма в сфере природопользования является установление цены на природные ресурсы, за пользование недрами, землей, водой, растительным и животным миром, рекреационными и другими ресурсами и предоставление их за соответствующую плату в пределах установленных лимитов и за сверхлимитное потребление, что создает условия для бережного отношения к естественным богатствам и снижению загрязнения окружающей среды. Очевидно, за нерациональное, сверхнормативное использование природных ресурсов платежи должны взиматься в повышенном размере. Поскольку природные и экономические условия на огромной территории Казахстана весьма разнообразны и степень загрязнения среды неодинакова, видимо ставки платежей на эти ресурсы должны быть дифференцированными по регионам.

Состояние изученности проблемы. В процессе выполнения исследования авторы рассмотрели суждения по различным аспектам проблемы охраны окружающей среды в трудах ученых-экономистов Казахстана и других ученых зарубежом.

С точки зрения экономической науки важными являются работы Хачатурова Т.С. [2, 3,4,], в которых рассмотрены народнохозяйственные проблемы с учетом охраны природы, в частности, проблемы комплексного планирования использования природных ресурсов. Проблемам ресурсосбережения и их взаимосвязи с экологическим фактором в экономическом развитии посвящены работы Папенова К.К. [5], Голуб А.А., Струковой Е.Б. [6, 7, 8, 9], Гофмана К.Г. [10, 11] и многих других ученых и специалистов. В зарубежных странах вопрос о взаимоотношении общества и природы в весьма острой форме поставлен в рядах ученых – Т.Н. Хаймана, Джон А., Диксон, Майкла Бойда и др.

Однако в рамках данной проблемы отдельные теоретические и методические вопросы до сих пор являются предметом научных дискуссий и требуют своего решения.

Критический обзор специальной литературы приводит к выводу о том, что дальнейшее исследование проблемы управления природоохранной деятельностью должно быть ориентировано на поиск и совершенствование различных инструментов экономического механизма природопользования.

Актуальность указанных выше проблем, их недостаточная изученность, а также особая теоретическая и практическая значимость обусловили выбор темы диссертации, ее целевую направленность, содержание, методы исследования.

Цель работы – исследование теоретических и методологических вопросов управления природопользованием и на этой основе разработка научно-практических рекомендаций и их совершенствование.

Для достижения этой цели потребовалось решить следующие задачи:

– изучить современное состояние экологической ситуации РК;

– проанализировать основные направления казахстанской экологической поли-тики и выявить особенности ее формирования;

– изучить новейшие достижения зарубежного опыта рыночных механизмов управле-ния природопользованием;

– исследовать специфику создания в Казахстане рынка купли продажи прав на выб-рос загрязняющих веществ;

– разработать механизм экономического управления рациональным природопользованием РК в условиях рынка, методические рекомендации, позволяющие определить платежи за пользование ресурсами животного мира, рыбными ресурсами.

Объектом исследования являются природопользователи (предприятия различных форм собственности и хозяйственной деятельности), а также органы управления природоохранной деятельности и контролирующие органы.

Предметом исследования являются организационные и экономические основы управления природоохранной деятельностью республики в период становления рынка.

Теоретической и методологической основой явились эколого-экономические Законы природопользования и Указы Президента, постановления Правительства Республики Казахстан по природоохранным проблемам, труды многих отечественных и зарубежных ученых по вопросам совершенствования экономического механизма регулирования природопользования.

В ходе реализации поставленных задач изучена и критически переработана зарубежная и отечественная научная литература по исследуемой проблеме. Обобщены статистические данные, опубликованные в различных изданиях и полученные лично автором. Важным информационным источником послужили законы и нормативные акты Республики Казахстан, Постановления, рекомендации и инструкции государственных органов по природоохранным проблемам.

Научная новизна исследования состоит в следующих полученных методических и практических результатах, которые являются:

– определены основные направления казахстанской экологической политики и выявлены особенности ее формирования;

– обобщен и систематизирован накопленный зарубежный опыт рыночных механизмов управления природопользованием, определены направления его адаптации в Казахстане;

– разработаны методические рекомендации по созданию в Казахстане рынка купли-продажи прав на выброс загрязняющих веществ от стационарных источников;

– разработаны методические рекомендации по определению платежей за пользование ресурсами животного мира и рыбными ресурсами с наглядными расчетами.

Практическая значимость полученных результатов состоит в использовании содержащихся в работе теоретических положений и методических подходов для совершенствования экономического механизма управления рациональным природопользованием.

1.1. Концепция экологической безопасности на современном этапе развития экономики

В настоящее время экологические проблемы становятся предметом интереса и изучения экономических наук.

Экономические науки изучают общие отличия хозяйственной жизни во всех видах производства: то, что их объединяет, и то, что показывает экономическое развитие общества как единый процесс; общие характеристики хозяйственной жизни в отдельных способах производства. Эти науки до последнего времени не интересовались отношением между средой и экономикой. Такое отношение экономических наук к среде человека являлось предметом критики. Затем оно стало меняться. Наконец, защита окружающей среды стала рассматриваться как экономическая проблема с точки зрения макро- и микроэкономических проблем.

Быстрый экономический рост, основанный на развитии производительных сил, обеспечивает и их дальнейшее развитие, улучшение общественного богатства, подъем культурного и материального богатства и увеличение средней продолжительности жизни. Но в то же время следствием ускоренного экономического роста является деградация природы, т.е. нарушение экологического равновесия. Деградация одного компонента раньше или позже ведет к деградации другого. Наконец, нарушение экологического равновесия в природе (загрязнение атмосферы, почвы, воды, морей, накопление твердых отходов и отравляющих веществ в пище, шум, радиоактивные элементы) является результатом освоения природы, производства в социально-экономических условиях, при которых цель производства – присвоение как можно большего богатства.

Осознание необходимости экологизации социально-экономического развития современного общества – достаточно ответственный и сложный процесс.

По мнению А.М. Добровольской и В.С. Раппопорта [16], социально-экономическая проблема охраны окружающей среды в настоящее время не нашла достаточно полного и строгого определения. Как ее постановка, так и содержание во многих случаях понимаются неоднозначно, что соответственно приводит к различию в подходах при организации управления такой деятельностью.

Из приведенного выше определения следует, что такие важнейшие экономические и социальные задачи, как повышение эффективности общественного производства, рациональное использование природных ресурсов, сырья, материалов, переработка отходов производства и, наконец, поддержание качества окружающей среды, проведение природоохранных мероприятий, рассматривались и решались разрозненно и изолированно друг от друга.

Остановимся подробнее на основных подходах и положениях, касающихся определения природных ресурсов.

Выделение природных ресурсов является прежде всего требованием социально-экономического характера. Природные ресурсы, в различных формах вовлекая в сферу деятельности общество, самым непосредственным образом влияют на результаты его экономического развития, продуктивность производства и производительность труда.

В экономической науке XIX века природные ресурсы и их роль в функционировании экономической системы были одним из ключевых объектов при изучении процессов производства и обмена и экономической динамики. Сами природные ресурсы принимались за специфические материальные ресурсы, а критерием рациональности являлась экономическая эффективность того или иного технического метода их использования. С одной стороны, масштабы хозяйственной, прежде всего индустриальной, деятельности человека как на локальном уровне, так и на макроуровне оставались много ниже потенциала природных ресурсов и естественных процессов компенсации последствий этой деятельности. С другой стороны, уровень научных знаний о природных процессах был недостаточным для обоснованной оценки и масштабов рационального с экологической точки зрения использования природных ресурсов и его последствий.

В середине XX века темпы экстенсивного роста экономики индустриально развитых стран и масштабы вовлечения природных ресурсов достигли уровня, который привел к качественным изменениям характера взаимодействия человеческой деятельности и природной среды.

В современном варианте потенциальные последствия экстенсивного социально-экономического развития общества, основанного на расширяющемся вовлечении природных ресурсов, продемонстрированы в работах Форрестера, Мидоуза, Месаровича и Пестеля [17] еще в конце 60-х – начале 70-х годов. Они показали, что этот путь неизбежно и довольно скоро натолкнет общество на ограничения, которые сделают невозможным его продолжение и приведут к кризису.

Поэтому можно говорить, что с начала 70-х годов стала формироваться такая новая научная дисциплина, как экономика природных ресурсов, в рамках которой с тех пор появилось много работ, в которых анализируются различные аспекты этой проблематики и разрабатываются подходы к построению экономической политики в этой сфере с учетом современных реалий.

Работам этих авторов свойственны излишняя схематичность, упрощенность, но тем не менее с точки зрения разработки современного подхода к оценке различных методов и моделей использования природных ресурсов сохраняется значение этих работ. Оно определяется тем, что в них впервые в развернутом виде проблемы использования природных ресурсов поставлены и исследуются в динамической долгосрочной постановке в терминах системного анализа и рассматриваются как глобальные проблемы, стоящие перед всем человечеством. Наряду с задачами использования ресурсов актуализированы проблемы сохранения ресурсов для обеспечения будущего развития и даже выживания.

В новой глобальной социально-экономической и экологической ситуации возникла потребность в современной оценке основных проблем, связанных с вовлечением природных ресурсов в экономику.

При этом обнаружилось, что в подавляющем большинстве фундаментальных экономических исследований и теорий, появившихся в XX веке, вплоть до 70-х годов, природные ресурсы почти не упоминаются. Это объясняется тем, что хотя именно доступность природных ресурсов в достаточных объемах при низких ценах на них была базовым фактором потенциала продолжительного экономического роста в этот период, но в реальной жизни для большинства индустриально

развитых стран ограничения, связанные с этими видами ресурсов, не играли существенной роли.

Таким образом, суммируя основные результаты экономического анализа широкого круга проблем, связанных с эффективным использованием природных ресурсов, можно сказать, что они обеспечивают базис для оценивания конкретных ситуаций и выработки стратегий рационального, экономически эффективного использования природных ресурсов.

А.А. Минц [18] обусловливает выделение природных ресурсов из природной среды технической возможностью, экономической необходимостью и целесообразностью использования, определяемым уровнем изученности. В Гринг-мут [19] считает, что фактором, определяющим, какие природные потенциалы и в каком объеме следует из «природы самой по себе» превратить в «природу для общества» – в природные ресурсы, является рост производительности труда. Н.Ф. Реймерс [20] в ранг природного ресурса возводит природные объекты и явления, используемые в настоящем, прошлом, будущем для прямого и непрямого потребления, способствующие созданию материальных богатств, воспроизводству трудовых ресурсов, поддержанию условий существования человечества и повышению качества жизни.

Т.С. Хачатуров [3, 4, 21] считает, что природные ресурсы – это элемент или результаты функционирования природных систем, которые в той или иной мере используются человеком в самых разнообразных целях и могут быть вовлечены в его деятельность в будущем. А по А.Н. Букрееву [22, 23], природным ресурсом является природный фактор, удовлетворяющий отношениям общественной потребности в ресурсе, изученности, возможности использования и обладающий свойством потребительской стоимости. По мнению В.В. Степина [24], природными ресурсами являются элементы и силы природы, которые могут быть использованы в производственной и непроизводственной сфере для удовлетворения потребности людей.

Ценность ресурсу придает не только его ограниченность, но и открытие новых полезных функций. Практика природопользования раскрывает широкий спектр направлений использования природных объектов, процессов, явлений, природных компонентов. Критериями, определяющими конкретный вид пользования элементами природной среды, служат общественная необходимость и целесообразность.

Вместе с тем сложившаяся практика природопользования не позволяет в полной мере учитывать весь объем функций природного объекта, так как система природопользования построена на отраслевом принципе. Административно-хозяйственная система государственного управления природопользованием базируется на закреплении природных комплексов за отдельными хозяйственными единицами.

Основным недостатком такого подхода является ограничение функциональной значимости природных объектов. И только в последнее время началась ориентация ресурсопользования на территориальный, а не отраслевой принцип, на многоцелевое, а не на отраслевое использование. В этой связи при формировании эффективной системы ресурсопользования многофункциональная роль территориального природного образования должна стать доминирующей.

В.М. Рац [25] считает, что рационализация природопользования есть лишь один из аспектов более широкой проблемы – рационализации хозяйствования и основным субъектом хозяйствования, на уровне которого должна решаться эта проблема, является предприятие-природопользователь.

В настоящее время концепцией радикальной экономической реформы, направленной на формирование рыночных отношений, предусматривается сделать центром экономических отношений не орган управления, а непосредственно хозяйственное звено-предприятие, организацию. Ключевым вопросом нового механизма природопользования является вопрос о характере взаимоотношений хозяйственных субъектов-природопользователей с местными органами управления регионов. Сейчас эти взаимоотношения наполняются экономическим содержанием.

Как известно, экономическая теория ставила во главу угла трудовые ресурсы и способ производства и поэтому преимущественное внимание обращалось развитию общественных производительных сил. С учетом специфики Республики Казахстан и переходом ее экономики на рыночные отношения исследование естественных производительных сил приобретает ныне первостепенное значение.

Влияние использования природных ресурсов на производство, жизнь человека изучается представителями различных наук, преимущественно представителями естественных наук. Оно является многоаспектным и поэтому является предметом сравнительно нового направления в науке, называемого экономикой природопользования.

У экономики природопользования три направления. Первое -экономика защиты среды от загрязнений. Если бы эти загрязнения не оставались на Земле, проблема не возникала бы. Но отходы одного предприятия могут подорвать здоровье больших масс людей, существенно увеличить расходы других предприятий, способствовать миграции людей и пр.

Второе – собственно, эколого-экономическое. Промышленность не может функционировать изолированно от природной среды. Она должна потреблять природные ресурсы. А изъятие любых ресурсов ведет к сдвигу экологического равновесия.

Третье – оценочное направление. Природные ресурсы имеют цену. Она различна в разных местах и для ресурсов разного качества, сложно ее взаимодействие с общей экономической конъюнктурой, процессами обеспечения трудовыми ресурсами и другими социально-экономическими явлениями.

Загрязнение окружающей среды все в большей степени оказывает отрицательное воздействие на состояние здоровья человека, на природу и на протекание хозяйственной деятельности человека.

Сегодня в реализации целей управления природопользованием следует исходить из того, что основная трудность – это преодоление противоречия между объектом управления – окружающей природной средой, с одной стороны, и территориальной ограниченностью сферы действия принимаемых управленческих решений (границы района, области, республики).

По степени экономического и социального развития области Казахстана можно условно разделить на четыре группы.

Первая группа – это области, обладающие крупнейшими стратегически важными видами минеральных ресурсов: Атырауская, Мангистауская, Актюбинская

(нефть, газ, хромиты, фосфориты, ракушечник), Жезказганская (медные, свинцово-цинковые, железно-марганцевые, вольфрамо-молибденовые руды), Костанайская (железные руды).

Вторая группа – это области, специализирующиеся на производстве продукции базовых отраслей промышленности, позволяющие создать прочную платформу для стабилизации и вывода из кризиса экономики республики: Карагандинская, Павлодарская, Восточно-Казахстанская, г. Алматы.

Третья группа областей – специализируются на отраслях аграрно-промышленного, играющих ведущую роль в формировании продовольственного фонда республики Костанайская, Южно-Казахстанская, Акмолинская, Кокшетауская, Торгайская, Талдыкорганская, Алматинская, Северо-Казахстанская.

Четвертая группа областей – депрессивные районы с крайне низким уровнем развития, где в результате отрицательного антропогенного воздействия нарушено социально-экономическое воспроизводство, а также экологически бедствующие районы -Кызылординская, Семипалатинская, Талдыкорганская, Жамбылская, Торгайская области.

Неравенство положения регионов не могло не сказаться на уровне жизни и доходах проживающего в этих регионах населения.

Решающую роль в осложнении экологических проблем играют факторы социально-экономического развития – быстрый экономический рост и научно-технический прогресс, увеличение численности населения и урбанизации без учета требований к качеству окружающей среды.

Поступательное развитие экономики, все возрастающие масштабы производства требуют вовлечения в производство все новых объемов природных ресурсов. Вместе с тем, более 96–98% добываемого сырья выбрасывается в виде отходов производства и потребления. Несоизмеримо велико, по сравнению с готовым продуктом, потребление воды и воздуха.

Использование природных ресурсов с низким КПД породило проблемы размещения и переработки отходов, ликвидации отрицательных последствий загрязнения атмосферного воздуха, воды и почв вредными выбросами. Это возвело в объективную необходимость решение задачи рационализации природопользования в части согласования экологических требований и хозяйственного развития.

Нерациональная структура общественного производства, ориентированность его на получение преимущественно промежуточных результатов ведут к расточительному использованию природных ресурсов, дальнейшему обострению экологической ситуации.

В современных условиях фактором, оказывающим существенное влияние на состояние окружающей среды выступает научно-технический прогресс. При этом необходимо отметить, что достижения НТП могут оказывать как позитивное влияние, так и негативное.

В зависимости от научно-технических и социально-экономических возможностей целенаправленного изменения факторы окружающей природной среды можно подразделить на управляемые и неуправляемые. К управляемым факторам относятся: загрязненность воздушного бассейна, водных ресурсов и почв, лесистость территории, видовое разнообразие животного и растительного мира,

режим увлажнения, селеопасность, оползневая опасность. Неуправляемые факторы включают тип почв, рельеф местности, ветровой режим, температурный режим, сейсмичность территории и др.

Интеграция управления отдельными факторами окружающей природной среды в систему управления природной средой как единым целым предполагает совершенствование методологии управления отдельными параметрами ее качества, среди которых важнейшее место принадлежит предотвращению загрязнения окружающей природной среды.

Изучение социально-экономических закономерностей обмена веществ между человеком и природой является важным аспектом марксистского анализа общественного производства. Именно Маркс впервые поставил вопрос о необходимости целенаправленного управления кругооборотом вещества в процессе общественного производства. «Коллективный человек, – писал Маркс, – ассоциированные производители рационально регулируют этот свой обмен веществ с природой, ставят его под свой общий контроль, вместо того, чтобы он господствовал над ними как слепая сила: совершают его с наименьшей затратой сил и при условиях, наиболее достойных их человеческой природы и адекватных ей». Эти слова Маркса приобрели особую актуальность в условиях современной научно-технической революции, когда становятся все более очевидными многообразные отрицательные социальные последствия бесконтрольного роста техногенных выбросов в окружающую среду.

Сложившаяся в нашей стране система гигиенического нормирования окружающей среды основана на разработке показателей допустимого загрязнения в форме предельно допустимых концентраций (ПДК) вредностей в окружающей среде. Эти показатели отражают не минимальные, а максимальные требования к ее качеству с точки зрения безопасности для здоровья человека. Принцип определения ПДК вредностей в окружающей среде заключается в том, что при их соблюдении «не оказывается неблагоприятного влияния на здоровье, самочувствие и работоспособность населения и будущих поколений людей, обнаруживаемого современными методами исследования, а также не ухудшаются гигиенические условия жизни населения». Необходимость таких нормативов для управления качеством окружающей среды бесспорна, и то обстоятельство, что действующие в нашей стране нормативы предельно допустимых концентраций являются, как правило, значительно более жесткими, чем в развитых капиталистических странах, наглядно демонстрируют более высокий уровень требований к качеству окружающей среды, присущий социалистическому строю.

Вместе с тем, если рассматривать нормативы ПДК под углом зрения их социально-экономической природы, то нельзя не заметить их близости к целому ряду других социальных нормативов удовлетворения потребностей – научно обоснованных норм питания, нормативов обеспечения населения жилой площадью, предметами длительного пользования, услугами здравоохранения и т.п. Указанные нормативы, равно как и нормативы ПДК, исходят из необходимости создания наилучших условий для жизнедеятельности человека, в том числе и из требований обеспечения его здоровья. В этом смысле нормативы ПДК, так же как и упомянутые выше нормативы обеспеченности населения важнейшими

жизненными благами, являются перспективными оптимальными нормативами качества жизни человека, но не нормативами минимально допустимого по комплексу социальных условий качества его жизни в данном плановом периоде, какими являются, например, минимум заработной платы, минимум пенсионного обеспечения и т.п. Смешение этих двух типов нормативов было бы методологически ошибочным и практически вредным. Между тем, именно такое смешение может возникнуть, если рассматривать ПДК загрязнений в окружающей среде как непосредственную базу для государственных стандартов чистоты среды для всех районов страны уже в настоящее время.

Оставляя в стороне вопрос о повсеместной практической достижимости таких требований к чистоте окружающей среды в ближайшей перспективе, отметим лишь, что смещение приоритетов в пользу скорейшего достижения гигиенических нормативов чистоты среды (ПДК) по сравнению, например, со скорейшим достижением нормативов обеспеченности жильем отнюдь не обязательно означало бы наибольший выигрыш с точки зрения охраны здоровья населения.

Итак, ПДК следует, по нашему мнению, рассматривать как перспективные нормативы качества окружающей среды для фактически загрязненных территорий, где фактическое загрязнение к началу планируемого периода превышает уровень ПДК. В качестве одного из показателей стандарта качества окружающей среды для таких территорий целесообразно, на наш взгляд, устанавливать значения концентрации загрязнений типа КУЗ (критические уровни загрязнения), при которых не возникает недопустимых в вышеуказанном смысле последствий загрязнения, т.е. не наносится необратимый ущерб здоровью людей и состоянию экосистем.

Современные масштабы и характер воздействия загрязнений на эффективность общественного производства обусловливают необходимость вычленения в составе общественно необходимых затрат особой компоненты, которую можно назвать издержками загрязнения.

Будем называть совокупность параметров, характеризующих объемы, физико-химические свойства и условия распространения техногенных выбросов в окружающей среде, вектором техногенных выбросов. Тогда каждому вектору техногенных выбросов можно поставить в соответствие некоторый уровень дополнительных народнохозяйственных затрат, обусловленных данным вектором выбросов. К ним относятся:

– затраты, необходимые для уменьшения поступления выбросов в окружающую среду до уровня, соответствующего заданному значению вектора техногенных выбросов;

– затраты на компенсацию негативных социальных последствий выбросов, поступивших в окружающую среду в соответствии с принятым значением вектора техногенных выбросов;

– затраты на возмещение потерь сырья и продуктов с отходящими газами и сточными водами.

Загрязнение окружающей среды техногенными выбросами промышленных предприятий приводит к возникновению различных видов материального ущерба (повышению заболеваемости населения, ускорению износа зданий и сооружений, падению продуктивности в сельском хозяйстве и т.д.). Денежная оценка

материального ущерба, вызванного выбросами загрязняющих веществ предприятиями представляет собой экономический ущерб. Наличие загрязнения порождает необходимость снижения выбросов с помощью проведения природоохранных мероприятий, которые, в свою очередь, требуют затрат труда, живого и овеществленного. Совокупность этих двух видов издержек, связанных с неблагоприятным воздействием производства на окружающую среду, представляет собой, по определению К.Г. Гофмана [10], издержки загрязнения окружающей среды.

Следовательно, под издержками загрязнения в широком смысле следует понимать прирост затрат в производственной и непроизводственной сферах народного хозяйства, соответствующий данному вектору техногенных выбросов.

Рассмотрим теперь более подробно экономическое содержание и специфику формирования издержек загрязнения как особой компоненты народнохозяйственных издержек. Как видно из сказанного выше, издержки загрязнения представляют собой конгломерат затрат, весьма разнородных по месту и условиям возникновения, что на первый взгляд, делает сомнительной целесообразность объединения их в единую категорию издержек. Более детальный анализ показывает, однако, наличие тесной взаимозависимости и внутренней связи между отдельными составляющими издержек загрязнения. Как мы уже отмечали, каждому вектору техногенных выбросов в окружающую среду можно поставить в соответствие некоторый комплекс мероприятий, направленных на уменьшение выбросов или ограничение их загрязняющего воздействия. Связь между этими мероприятиями и уровнем загрязнения среды очевидна: чем в больших масштабах осуществляются противозагрязняющие мероприятия, тем меньше уровень загрязнения, и наоборот. В составе комплекса противозагрязняющих мероприятий можно выделить три основных вида деятельности, которым соответствуют три главные статьи издержек предотвращения загрязнения:

– строительство и эксплуатация специализированных природоохранных систем и объектов – различного рода очистных и обезвреживающих (высотные дымовые трубы) сооружений и устройств для источников вредных выбросов, а также создание защитных зон вокруг этих источников;

– разработка и внедрение замкнутых (малоотходных) технологических процессов, обеспечивающих комплексное использование всех компонентов материально-энергетического потока при минимальном поступлении вредных выбросов в окружающую среду;

– создание системы контроля и управления уровнем загрязнения окружающей среды, включающей подсистему автоматизированного контроля уровня загрязнения воздушного и водного бассейнов, подсистему регулирования промышленных выбросов в периоды опасных гидрометеорологических ситуаций (когда создаются условия для резкого повышения концентраций вредностей в окружающей среде) и подсистему контроля и регулирования автотранспортного загрязнения воздушного бассейна.

Каждому из этих видов деятельности корреспондируют соответствующие статьи издержек предотвращения загрязнения однако далеко не все эти затраты в настоящее время учитываются и включаются в состав производственных издержек. Так, например, затраты на сооружение и эксплуатацию общегородских или

районных водоочистных сооружений часто не учитываются в составе соответствующих затрат предприятий, пользующихся услугами этих сооружений. Удорожание региональной инфраструктуры за счет создания защитных зон вокруг источников вредных выбросов, выноса промышленных предприятий за пределы заселенных территорий и т.п. также обычно не выделяется в качестве особой статьи в составе сметной стоимости строительства и может быть установлено в каждом конкретном случае лишь с помощью специальных расчетов.

Еще сложнее обстоит дело с затратами на разработку и внедрение замкнутых (малоотходных) технологий. Такие технологии (и в этом их главное преимущество) являются по своей природе многоцелевыми, позволяя не только уменьшать загрязнение окружающей среды вредными выбросами, но и одновременно повышать эффективность производства за счет более полной утилизации исходного сырья и топлива. Поэтому затраты на реконструкцию и модернизацию производства при переходе на замкнутые технологические процессы можно рассматривать одновременно и как издержки производства в узком смысле, и как издержки предотвращения загрязнения. Так, например, получение серной кислоты за счет утилизации сернистого ангидрида отходящих газов предприятий цветной металлургии позволяет не только производить серную кислоту с затратами на 30 % меньшими, чем на предприятиях химической промышленности, но и одновременно уменьшить загрязнение атмосферы сернистым ангидридом. Затраты на производство серной кислоты предприятиями цветной металлургии можно с равным основанием рассматривать и как затраты на предотвращение атмосферного загрязнения, т.е. относить их либо на производство серной кислоты, либо на стоимость атмосфероохранных мероприятий.

С этой точки зрения вычленение издержек предотвращения загрязнения из общего итога производственных издержек является столь же условным приемом, как и любое распределение затрат между продуктами комплексной переработки сырья. Важно, однако, отметить, что для целей эффективного управления производством с учетом требований охраны окружающей среды важно не столько вычленение издержек предотвращения загрязнения из общей суммы производственных затрат, сколько учет (наряду с производственными затратами) также и издержек компенсации социальных последствий загрязнения.

Обратимся теперь к рассмотрению второй составляющей издержек загрязнения – издержек компенсации негативных социальных последствий загрязнения окружающей среды. Если издержки предотвращения загрязнения находятся в прямой связи с вектором техногенных выбросов, то связь между техногенными выбросами и издержками компенсации имеет косвенный характер. Промежуточными звеньями, связывающими вектор техногенных выбросов с издержками компенсации, являются, во-первых, медико-биологические и физико-химические последствия загрязнения среды и, во-вторых, негативные социальные последствия загрязнения.

Вредное влияние на здоровье людей могут оказывать и загрязненные водные источники. Особенно опасно для здоровья человека загрязнение воды токсичными веществами и хозяйственно-фекальными стоками – носителями желудочно-кишечных инфекций. Не вызывает сомнений также и отрицательное воздействие

атмосферных загрязнений на урожайность, питательную и кормовую ценность сельскохозяйственных культур, состояние лесонасаждений, а водных загрязнений – на продуктивность животноводства, на условия орошаемого земледелия и продуктивность рыбного хозяйства. Исследования и эксперименты показывают также многократное ускорение скорости коррозии железа и его сплавов, алюминиевых и других сплавов под воздействием атмосферных загрязнений. Загрязнение водных источников приводит к повышенной коррозии металлической обшивки судов, засорению систем охлаждения при использовании загрязненных вод и т.п.

Таковы непосредственные (медико-биологические и физико-химические) последствия загрязнения окружающей среды техногенными выбросами. Они неизбежно влекут за собой отрицательные социально-экономические последствия, проявляющиеся в четырех основных формах:

– ухудшение «качества жизни» в широком смысле этого понятия, заключающееся в ухудшении здоровья населения, нарушении условий для труда и отдыха в загрязненных районах (потеря лесами и водоемами их рекреационных достоинств, необходимость более частой стирки и чистки одежды, уборки жилых помещений и т.д.);

– потери рабочего времени, связанные с повышенной заболеваемостью населения – в данном случае загрязнение окружающей среды выступает в конечном счете как фактор, снижающий эффективность использования трудовых ресурсов данного региона;

– уменьшение народнохозяйственной ценности природных ресурсов как следствие падения продуктивности сельскохозяйственных и лесных угодий в зонах загрязнения, повышенных затрат на водоподготовку промышленностью и коммунально-бытовым хозяйством, уменьшения рыбопродуктивности водоемов, их рекреационной ценности и т.п.;

– интенсификация коррозионных процессов в загрязненной среде, равно как и повышенное загрязнение и засорение технологического оборудования, ведущие в конечном счете к ускорению износа основных фондов в зоне загрязнения.

Негативные социальные последствия загрязнения окружающей среды непосредственно обусловливают возникновение специфической категории народнохозяйственных издержек, которые называются издержками компенсации социальных последствий загрязнения, или экономическим ущербом от загрязнения среды. Негативные социальные последствия загрязнения вызывают определенную структурную перестройку общественного производства как своеобразную «защитную реакцию» на загрязнение среды. При этом в народном хозяйстве возникают специфические компенсационные процессы, направленные на преодоление или смягчение негативных последствий загрязнения.

Таким образом, экономический ущерб от загрязнения складывается из дополнительных затрат на удовлетворение потребности в продукции природоэксплуатирующих отраслей, ремонт основных фондов в зоне загрязнения и т.д. Указанные компоненты экономического ущерба можно выделить как в составе ущерба от атмосферного загрязнения, так и в составе ущерба от загрязнения водных источников, однако их относительная значимость для рассматриваемых видов ущерба различна.

Если объекты, расположенные в зоне атмосферного загрязнения, вынуждены «потреблять» воздух без предварительной его очистки, то значительная часть водопотребителей – в первую очередь промышленность и коммунально-бытовое хозяйство имеют возможность доводить чистоту воды до требуемого уровня за счет мероприятий по водоподготовке, переноса водозабора или освоения новых источников водоснабжения. Поэтому в составе ущерба от атмосферного загрязнения решающую роль играют затраты, возникающие вследствие «потребления» загрязненного воздуха, а в составе ущерба от загрязнения водных источников значительное место принадлежит затратам на предотвращение использования загрязненной воды.

Две составные части издержек загрязнения связаны между собой следующим образом: рост затрат на охрану природы вызывает снижение экономического ущерба, и наоборот. Основным элементом экономического механизма охраны среды должно быть, по мнению К.Г. Гофмана [11], включение в состав издержек производства важнейших отраслей – «загрязнителей» окружающей среды издержек загрязнения и создание, таким образом, экономической заинтересованности у предприятий в снижении выбросов. Экономический ущерб учитывается в издержках производства предприятий в форме платы за загрязнение. Считается, что предприятие будет заинтересовано в осуществлении природоохранных мероприятий до тех пор, пока затраты на них покрываются экономией на плате за загрязнение.

Третьей главной статьей в составе издержек загрязнения окружающей среды являются издержки компенсации сырьевых потерь, возникающих в результате техногенных выбросов в окружающую среду. В составе водных и особенно воздушных выбросов в окружающую среду содержится множество видов сырья и топлива, потери которых компенсируются производством этих продуктов на специализированных предприятиях. Так, например, потери серосодержащего сырья в газовых выбросах металлургических заводов и тепловых электростанций компенсируются производством серы, серной кислоты и т.п. на предприятиях химической промышленности, потери нефтепродуктов в промышленных стоках компенсируются их производством на нефтеперерабатывающих заводах и т.п. Определение величины соответствующих компенсационных издержек не вызывает методологических трудностей – они равны стоимости теряемого сырья, исчисленного по общественно необходимым затратам на прирост его производства.

Из сказанного видно, что три основные составляющие издержек загрязнения – издержки предотвращения, издержки компенсации и сырьевые потери – находятся в функциональной зависимости друг от друга. При этом издержки предотвращения и компенсации находятся в обратной зависимости (возрастание одних обязательно сопровождается уменьшением других). Такой же характер носит связь, между издержками предотвращения и сырьевыми потерями, хотя здесь снижение сырьевых потерь достигается лишь при переходе на замкнутые (малоотходные) технологические процессы. Таким образом, указанные составляющие издержек загрязнения не только взаимно дополняют, но и в определенной степени взаимозаменяют друг друга, т.е. путем увеличения затрат по одной из этих составляющих можно добиться снижения затрат по другим составляющим. Иными словами, основные составляющие издержек загрязнения находятся в такой же

взаимозависимости, как и, например, текущие и капитальные затраты в составе приведенных затрат (или затраты на оплату живого и овеществленного труда в составе себестоимости продукции), снижение одной из составляющих издержек не обязательно означает здесь снижения издержек загрязнения в целом.

О.Ф. Балацкий [26, 27, 28], рассматривая негативное влияние загрязнения окружающей среды технологическими выбросами отмечает, что по отношению к источнику загрязнения и объектам, испытывающим его отрицательные воздействия, экологические издержки можно классифицировать двояко: как издержки предотвращения загрязнения и как издержки загрязнения (экономический ущерб). К первым автор относит затраты на мероприятия, проводимые либо в источнике загрязнения, либо на путях миграции загрязняющих агентов к реципиентам с целью предохранения окружающей среды от загрязнения. Они расходуются по двум основным направлениям: на мероприятия, снижающие выброс вредных веществ в окружающую среду, либо на мероприятия, не снижающие выброса вредных веществ в окружающую среду, однако позволяющие влиять на их распространение в окружающей среде, нейтрализующие их или изолирующие от прямого контакта с реципиентами. Ко второму виду издержек загрязнения О.Ф. Балацкий относит собственно ущерб.

Классификацию издержек мы встречаем также у Р.Л. Раяцкаса [20]. У всех авторов важнейшим принципом разделения экологических издержек на затраты и собственно ущерб является то, что первые относятся к факторам воздействия, вторые – к факторам восприятия.

Выделение ущерба необходимо в целях экономической интерпретации такого вида воздействия, как ухудшение качества, количества и возможностей эксплуатации природных ресурсов. В новой системе природопользования, основанной на принципе платности, этот вид воздействия наряду с изъятием природных ресурсов также должен быть охвачен новыми отношениями. Основой формирования их в таком случае становится показатель экономической оценки последствий воздействия, т.е. показатель экономического ущерба.

Следует отметить, что роль показателя экономической оценки природных ресурсов прежде сводилась в основном к выбору вариантов прироста производственных мощностей отраслевых предприятий ресурсопользования. В условиях централизованного планирования на основе данного показателя решались три основные задачи: определение ресурсных потерь при отведении территорий под другие отличные от существующих формы пользования; оптимизация размещения производительных сил и соответственно капиталовложений в развитие отраслей; обоснование и расчет оптимального размера площади переориентируемых участков. Все это способствовало учету и распределению природных ресурсов как части национального богатства.

В новых условиях суверенизации и провозглашения равноправия различных форм собственности на природные ресурсы требуется некоторая переоценка взглядов на определение данного показателя и его функции.

Функция показателя экономической оценки, ранее необходимая для использования в обязательных к выполнению государственных плановых решений, ныне сводится только к рекомендациям по организации на местах наиболее

целесообразного использования природных территорий. Вместе с тем усиливается роль оценки в экономических отношениях между собственником и пользователем ресурса. Естественно, эти отношения зависят от состояния финансов, производственных фондов, обеспеченности квалифицированной рабочей силой, научно-технического потенциала, социально политической стабильности, национальных особенностей и традиций и др. Тем не менее основная роль данного показателя замыкается на уровне региональной экономики.

В новых условиях несколько изменяется и роль показателя экономического ущерба, ранее широко используемого для определения эффективности природоохранных затрат. Передача в собственность производственных фондов и природных ресурсов в итоге позволит четко определиться с «виновной» и «пострадавшей» сторонами, их правами и ответственностью. Поэтому данный показатель должен функционировать прежде всего в регулировании их взаимоотношений, касающихся решения экологических проблем.

Последние законодательные документы подтверждают необходимость перехода экономики суверенных государств к платному ресурсопользованию. Право собственности на природные ресурсы, а также право владения и пользования земельными участками расширяют характер природопользования, самостоятельность производителей, их экономическую независимость, что в определенной мере будет способствовать оживлению производства. Однако в стороне остается такая проблема природопользования, как выработка системы мер эффективного регулирования, антропогенного воздействия на состояние окружающей среды. Одной из мер, противостоящих такому воздействию, является введение платы за территориальные природные участки – природные ресурсы. Формы и механизм платы могут быть различными, но принцип платности должен оставаться неизменным.

Ресурсовладение и ресурсопользование дают право использовать все ресурсные функции природного участка, т.е. все полезные свойства данного природного образования. Поэтому плата за ресурс должна основываться на качестве и местоположении природного участка, т.е. на тех полезностях, которые может дать его использование, а также возможность эксплуатации с целью удовлетворения потребностей.

1.2. Формирование экономического механизма регулирования экологической безопасности

Оценка состояния окружающей среды в республике, сложившегося в результате хозяйственной деятельности, позволяет выделить регионы, находящиеся на грани экологической катастрофы. Среди них можно назвать, прежде всего, Аральскую и Балхашскую водохозяйственные проблемы [44, с. 23].

Избежать катастрофы этих и других регионов можно с помощью корректировки курса экономического развития с учетом интересов экологии и экономики. Это возможно посредством выработки новой эколого-экономической политики. Ее целью должно стать создание новой системы экономического управления природопользованием, обеспечивающей оптимальное использование природных ресурсов и прежде всего водных источников. Необходимы ограничения в использовании особенно водных ресурсов в местах, где существует экологическая

напряженность; переходить к поэтапному переходу от дестабилизированного положения к нормативному использованию ресурсов окружающей природной среды [83, с. 198].

Особую роль играет система экономических методов, критериев, показателей, нормативов, правовых норм, воздействия на природопользователей, составляющих основу экономического механизма природопользования. Суть этого механизма реализуется через основной принцип рационального природопользования – загрязнитель, и пользователь природных ресурсов несет основные расходы на восстановление нарушенной природной целостности, а также внедрение экологически чистых технологий и материалов [84, с. 5].

Стимулирование природопользователей в природоохранных мероприятиях, рациональном использовании природного потенциала осуществляется с помощью экономического механизма природопользования, который строится пока на системе экологических платежей [85, с. 77].

Экономический механизм природопользования в Казахстане намечено осуществлять в два этапа. Сейчас реализуется первый этап. Он предполагает введение платежей за выбросы (сбросы) загрязняющих веществ и размещение отходов производства; плату за потребление природных ресурсов; обеспечение мер по экономическому стимулированию природоохранной деятельности предприятий; отмену налогообложения части прибыли, которая направляется на природоохранные цели; создание разноуровневой системы бюджетных и внебюджетных фондов охраны природы [86, с. 15].

Использование природных ресурсов в Казахстане осуществляется как общее, так и специальное.

Общее природопользование осуществляется для удовлетворения насущных потребностей населения республики без целевого закрепления ресурсов и на бесплатной основе. При специальном природопользовании природопользователю передаются в пользование или аренду природные ресурсы для осуществления хозяйственной или иной деятельности и непременно на платной основе.

В соответствии с законом «Об охране окружающей природной среды в Казахской ССР», принятым Верховным Советом в августе 1991 г. и с законом РК «Об охране окружающей среды» от 15 июля 1997 г., специальное природопользование осуществляется на платной основе. При этом очень важно рассчитать оптимальные тарифы, которые должны строиться с учетом внутренних потребностей и мировых цен, отличающихся высокой рыночной неустойчивостью [23, с. 7].

Специальное природопользование включает в себя две группы платежей:

I группа – платежи за загрязнение выбросами и сбросами вредных веществ, размещение отходов в окружающей среде, в которую входят:

– платежи за выбросы (сбросы) загрязняющих веществ и размещение отходов, регулируемых нормативной базой;

– платежи за выбросы (сбросы) загрязняющих веществ и размещение вредных отходов сверх установленных нормативов.

II группа – платежи за использование земельных и водных ресурсов, биоресурсов водоемов, животного мира, лесов и не древесной растительности, ресурсов недр, а также рекреационного потенциала. Сюда относятся два вида платежей –

это за использование природных ресурсов в пределах установленных нормативов, охрану и воспроизводство природных ресурсов.

В Республике Казахстан действует система платности за загрязнение окружающей среды. Так, в 1989 г. Госкомприродой Казахской ССР были разработаны и утверждены протокольным решением Президиума Совета Министров Казахской ССР и введены в действие методические рекомендации по определению платежей за сверхнормативное загрязнение природной среды и размещение отходов. Отсутствие нормативно-правовой базы и ограниченность методики, в частности, стимулирование предприятий к внедрению более совершенной техники очистки загрязнений, сложность при расчете платежей для предприятий не имеющих очистных сооружений создало трудности при внедрении в практику хозяйствования. Несмотря на недостатки уже в 1990 г. в республике сделано основное – это положено начало внедрению экономического механизма природопользования [87, с. 28].

Затем в 1992 году с учетом требований закона «Об охране окружающей природной среды в Казахской ССР» Министерством экологии и биоресурсов Республики Казахстан были утверждены методические указания и рекомендации главам областных администраций по очередности их внедрения [31, с. 6].

Экономические реформы при соответствующих законодательных и нормативных актах предусматривали значительные права по управлению социальными, экономическими и природоохранными процессами на подведомственных территориях руководителей областных и городских акиматов.

Платежи за загрязнение окружающей природной среды введены решениями глав областных администраций и действуют во всех областях республики.

Сложнее ситуация с введением платежей за пользование природными ресурсами. Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды подготовлен проект закона «О платежах за специальное пользование природными биологическими ресурсами». Однако в нем не отражены интересы неправительственных организаций, поскольку в связи с перебазированием его центрального органа в г. Кокчетав население отдалено от участия в разработке нормативных документов.

В соответствии с законом «Об охране окружающей природной среды» ставки платежей за выбросы (сбросы) загрязняющих веществ и размещение отходов производства и потребления в окружающей природной среде в пределах нормативов рассчитываются областными управлениями природных ресурсов и охраны окружающей среды по методическим документам, разрабатываемым Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Казахстан [31, с. 12].

За основу берется сумма, которая необходима для финансирования территориальных мероприятий по защите окружающей природной среды от загрязнений в данном году и общий объем выбрасываемых загрязняющих веществ. Размеры платежей за нормативные выбросы (сбросы) загрязняющих веществ и размещение отходов производства и потребления в окружающую природную среду индексируются. Индексация нормативов платы за загрязнение окружающей природной среды производится областными управлениями природных ресурсов и охраны окружающей среды один раз в полугодие.

Платежи за превышение нормативов выбросов (сбросов) загрязняющих веществ и размещение отходов производства, а также их потребления взимаются в бесспорном порядке местными органами Министерства доходов Республики Казахстан. Это создает идеальные условия для злоупотреблений с обеих сторон.

Платежи за охрану и воспроизводство поступают в госбюджет и учитываются там отдельной строкой. Они должны расходоваться на финансирование мероприятий по охране и воспроизводству природных ресурсов. Так, платежи на геологоразведочные работы входят в эту группу, из которых формируется фонд финансирования геологоразведочных работ.

Платежи за пользование природными ресурсами можно расценивать как реализацию права местного населения на владение природными ресурсами, расположенными на территории его проживания. Установление этих платежей осуществляется аналогично установлению платежей за охрану и воспроизводство природных ресурсов. Эти платежи перечисляются в бюджет, из которого финансируется строительство объектов социальной инфраструктуры.

Основой для предъявления платежей за загрязнение окружающей среды и за использование природных ресурсов являются лимиты и квоты на выброс загрязняющих веществ и использование природных ресурсов. Они устанавливаются Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды, другими министерствами и ведомствами, осуществляющими контроль за использованием природных ресурсов.

Годовые нормативы на выброс (сброс) загрязняющих веществ и размещение отходов устанавливаются, исходя из данных нормативов предельно допустимых выбросов (ПДВ) и сбросов (ПДС) и размещения отходов, которые должны быть разработаны для всех предприятий, загрязняющих природную среду.

Лимиты и квоты на использование возобновляемых природных ресурсов определяются на основе результатов анализа объема и структуры данного природного ресурса и расчета его количества, которое можно изъять без ущерба для экологической ситуации.

В законе «Об охране окружающей природной среды» установлено, что внесение платежей за специальное природопользование не освобождает природопользователей от уплаты штрафов и компенсаций, налагаемых на них за нарушение природоохранного законодательства, залповые и аварийные выбросы загрязняющих веществ [23, с. 8].

Система платежей за специальное природопользование регулирует производственный процесс, осуществляемый без нарушений природоохранного законодательства. А платежи за сверхнормативное загрязнение окружающей среды и использование природных ресурсов должны нести преимущественно стимулирующий характер. Они могут взиматься также и в безакцептном порядке, то есть не только в порядке судебного иска.

Для дополнительного финансирования мер по охране окружающей природной среды в 1992 г. в республике были сформированы республиканский и местные внебюджетные фонды охраны природы. Республиканский внебюджетный фонд охраны природы был образован при Министерстве экологии и биоресурсов, а местные внебюджетные фонды охраны природы – при управлениях экологии и биоресурсов.

Местные внебюджетные фонды охраны природы формируются за счет:

– платежей за нормативные выбросы (сбросы) загрязняющих веществ, размещение отходов производства и потребления в окружающей природной среде;

– платежей за превышение нормативов выбросов (сбросов) загрязняющих веществ, размещения отходов производства и потребления в окружающей природной среде;

– платежей за сверхнормативное и некомплексное использование (потери) природных ресурсов и получаемого из них сырья;

– штрафных платежей за аварийные выбросы (сбросы) загрязняющих веществ;

– средств, взыскиваемых с природопользователя в счет возмещения ущерба, причиненного государству нарушением природоохранного законодательства в результате хозяйственной деятельности;

– штрафов, взыскиваемых в административном и судебном порядке с должностных лиц и отдельных граждан за нарушение природоохранного законодательства;

– средств от реализации конфискованных орудий для охоты и рыболовства, а также продажи добытой с их помощью продукции;

– добровольных взносов юридических и физических лиц, природоохранных займов, лотерей и иных коммерческих мероприятий;

– других источников.

Средства местных внебюджетных фондов охраны природы используются органами экологии и биоресурсов по согласованию с главой соответствующей областной или городской администрации на:

кредитование строительства, технического перевооружения, реконструкции и капитального ремонта природоохранных объектов местного значения:

– проведение проектно-изыскательских и опытно-конструкторских работ по созданию новых видов природоохранной техники и технологий, автоматизированных систем мониторинга и технических средств для них;

– выполнение научно-исследовательских работ, территориальных программ и комплексных схем по охране природы и рациональному природопользованию;

– осуществление мероприятий, предупреждающих и компенсирующих негативные экологические последствия на территории региона;

– осуществление работ по восстановлению природных ресурсов, нарушенных хозяйственной или иной деятельностью, охране и воспроизводству растительного и животного мира;

– развитие особо охраняемых территорий;

– разработку систем экологических нормативов и информационных систем природопользования;

– отчисления в республиканский фонд охраны природы на развитие материальной базы, обеспечивающей создание республиканской системы контроля за состоянием окружающей природной среды.

Фонд охраны природы Республики Казахстан образуется за счет отчислений не менее 15 % средств, поступивших в местные внебюджетные фонды охраны природы.

Средства республиканского фонда охраны природы используются Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды по согласованию с Кабинетом Министров Республики Казахстан целевым назначением на:

– финансирование долевого участия в разработке и реализации целевых республиканских программ оздоровления окружающей природной среды в зонах экологического бедствия, а также программ сохранения и восстановления природных объектов межобластного значения;

– осуществление разработки и реализации республиканских программ, связанных с выполнением международных обязательств Республики Казахстан;

– проведение научно-исследовательских работ по разработке экологически чистых и ресурсосберегающих технологий, стандартов, норм и правил охраны окружающей среды, экологической безопасности;

– создание информационных банков экологической направленности;

– организацию международного сотрудничества в области охраны природы, изучения и распространения зарубежного опыта управления природопользованием;

– развитие материальной базы, обеспечивающей создание республиканской системы контроля за состоянием окружающей среды;

– повышение квалификации и обмен опытом работников природоохранных органов, пропаганду экологических знаний, экологическое воспитание и образование;

– проведение республиканских мероприятий экологической направленности;

– проведение республиканских экологических выставок, смотров-конкурсов, поощрение коллективов за внедрение наиболее эффективных природоохранных мероприятий.

В соответствии с Указом Президента Республики Казахстан от 27 января 1994 г. № 1529 фонды охраны природы включены в состав бюджета.

Установлен следующий порядок поступления и расходования средств фондов охраны природы.

Платежи за загрязнение окружающей природной среды перечисляются природопользователями в доход республиканского бюджета в размере 15 % и в доход областного бюджета – 85 % от причитающихся сумм.

Для перечисления средств в фонд охраны природы природопользователи выписывают два платежных поручения: одно на перечисление причитающейся суммы в доход республиканского бюджета и другое – в доход областного бюджета. При перечислении указанных сумм могут использоваться сводные платежные поручения. В графе «за что» платежных поручений указываются назначение платежа и платежный период.

Копии платежных документов и выписки из лицевых счетов вручаются учреждениями Нацбанка соответствующим финансовым органам (налоговым инспекциям) в установленном порядке.

Финансирование мероприятий за счет средств фондов охраны природы производится в пределах поступивших сумм.

Финансирование из местного бюджета осуществляется финансовыми органами путем перечисления средств платежными поручениями на текущие счета областных (городских) управлений экологии. Органы природных ресурсов и охраны окружающей среды перечисляют причитающиеся суммы на расчетные

счета предприятий и организаций для проведения природоохранных мероприятий в соответствии со сметами доходов и расходов, утвержденными решениями глав областных и городских администраций.

Средства республиканского фонда охраны природы расходуются целевым назначением путем открытия Министерством финансов Республики Казахстан кредитов Министерству природных ресурсов и охраны окружающей среды РК на финансирование природоохранных мероприятий. Указанные средства используются в соответствии со сметой расходов, рассмотренной и утвержденной на коллегии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды РК. Утвержденная смета представляется Министерству финансов республики для сведения и контроля при открытии финансирования.

Отчетность об использовании средств фондов охраны природы представляется органами природных ресурсов и охраны окружающей среды местным финансовым органам, Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды – Министерству финансов Республики Казахстан по форме и в сроки, установленные Министерством финансов по согласованию с Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды.

Контроль за правильностью исчисления, своевременностью внесения платежей в бюджет и за целевым использованием средств, выделяемых из фондов охраны природы, осуществляется органами налоговой службы, Казначейством и Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Казахстан. Однако общественность, например, НПО и СМИ от контроля за расходованием средств на природоохранные мероприятия отстранена, вследствие чего возможны злоупотребления.

В республике положено лишь начало внедрению экономического механизма природопользования. Этот экономический механизм с помощью лимитных и сверхлимитных платежей призван регулировать природопользование, осуществляемое на регулярной основе без нарушения природоохранного законодательства. Платежи за сверхлимитное загрязнение хотя и взыскиваются в кратном размере, но не относятся к штрафным санкциям, а являются экономическим стимулированием к осуществлению мероприятий по снижению загрязнений окружающей среды и экономному использованию природных ресурсов.

Действующий механизм полностью базируется на штрафах и компенсациях, налагаемых на нарушителей природоохранного законодательства. На наш взгляд, такой административный механизм не может принести ожидаемый результат в области охраны окружающей среды, поскольку приводит хозяйствующие субъекты к принуждению. Желаемый результат достигается в том случае, когда охрана окружающей среды будет выгодна хозяйствующему субъекту. Поэтому создание эффективного механизма взаимодействия производства с окружающей природной средой и является важной задачей совершенствования природоохранных мероприятий. Важно отметить, что формирование экономических методов управления в природоохранной отрасли – совершенно обособленная задача, которая заслуживает специального изучения [3, с. 119].

Разрешить перечисленные проблемы в определенной мере удалось в новом законе «Об охране окружающей природной среде Республики Казахстан»,

принятом 15 июля 1997 г. В нем помимо упомянутых инструментов платы за пользование, загрязнение, а также за охрану и воспроизводство природных ресурсов вводится также экономическое стимулирование охраны окружающей среды. Экономическое стимулирование охраны окружающей природной среды должно осуществляться через экологически ориентированную политику субсидий юридических лиц – природопользователей, эффективно осуществляющих охрану окружающей среды. Экологическое страхование представляет собой имущественную защиту юридических лиц при наступлении определенных страховых случаев, которые возникают из-за загрязнения окружающей среды и нерационального использования природных ресурсов. Это перспективное направление в совершенствовании экономического механизма управления процессом природопользования [9, с. 44].

В природоохранной деятельности на территории Республики Казахстан начинают проявляться рыночные принципы, например, когда предметом купли-продажи являются допустимое загрязнение, складирование отходов за плату и право на загрязнение. Такой подход наиболее полно соответствует принципу – «загрязнитель платит». Взаимосвязанная и регулируемая система купли-продажи прав на загрязнение для стран с переходной экономикой является значительным выходом из сложившейся ситуации, когда собственная промышленность имеет квоты, но не использует их. Поэтому правомерно ставить вопрос: кто же будет истинным владельцем такой квоты -предприятие, государство или местные органы власти. В случае преобладания выгод по продаже таких прав над проблемами производства, у владельца появится стремление снижать объемы своего производства, что негативно повлияет на социальные процессы.

Надо стремиться к оптимальному соотношению интересов хозяина территории, где осваиваются природные ресурсы, а также интересов владельцев промышленных отходов и хозяйствующими субъектами, которые решились пустить в переработку эти отходы. Это обеспечит комплексный подход в управлении процессом и природопользования и охраны окружающей среды [15, с. 40].

1.3. Принципы построения экономического механизма экологической безопасности

В условиях экономической реформы решение социально-экономических задач без серьезного учета экологических факторов невозможно. В индустриальных регионах окружающая среда с высокими экологическими параметрами требует передовых технологий производства, рационального использования природных ресурсов, повышения экологичности всей экономики. К сожалению резкое ухудшение состояния окружающей среды, истощение природных ресурсов, загрязнение атмосферного воздуха, воды, почв и лесов, начавшееся с крупных городов и промышленных центров, в настоящее время приобрело глобальный характер.

Принимаемые природоохранные меры оказались недостаточными для того, чтобы стабилизировать или улучшить состояние природы. Действовавший в 80-х гг. экономический механизм природопользования не отвечал требованиям охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов. В результате предприятия были не заинтересованы в соблюдении природоохранного законодательства, допускали сверхнормативное загрязнение природной

среды и во многих случаях неэффективно использовали естественные ресурсы. Все это настоятельно требовало разработки внедрения нового экономического механизма природопользования, чтобы способствовать и активно содействовать решению природоохранных задач в условиях хозяйственной самостоятельности предприятий, перехода их к рыночным отношениям.

Экономический механизм природопользования представляет собой целостную систему управления народным хозяйством [33, 34]. Он базируется на:

– принципах единства экологии и экономики, под которым понимается обеспечение устойчивого и динамичного развития экономики с целью повышения уровня жизни народа при одновременном улучшении качества окружающей среды;

– эффективном сочетании централизованного и местного управления. Это означает, что республиканские и местные органы управления несут ответственность за организацию эффективной системы охраны природы, рационального и комплексного использования природных ресурсов и состояние экологической обстановки на своей территории при:

– переходе от отраслевого к преимущественного территориальному управлению охраной природы;

– определении стратегических направлений природоохранной деятельности в Казахстане;

– разработке единой методологии определения экологических и решении республиканских проблем и выполнении принятых международных обязательств по охранен природы.

Эффективность освоения минеральных ресурсов в значительной мере зависит от эффективности экономического механизма хозяйствования, применяемого в деятельности предприятий, независимо от формы собственности. В условиях перехода к рыночным отношениям это имеет принципиальное значение, так как для повышения эффективности производства необходимо принять целый комплекс мер организационного, экономического механизма хозяйствования в использовании материальных ресурсов и экологизации горного производства.

Экономический механизм освоения МР включает в себя экономические условия, обеспечивающие реализацию возможностей, возникновение заинтересованности и усиление ответственности за рациональное использование минеральных ресурсов (рис. 63).

На наш взгляд, экономических механизм освоения ресурсов необходимо рассматривать по двум взаимосвязанным и взаимозависимым элементам. В первую группу входят элементы, оказывающие прямое воздействие на процесс освоения минеральных ресурсов. Сюда относятся: система организационно-технического развития, маркетингового обеспечения в использовании ресурсов и механизм хозяйственных договоров, система экономического стимулирования и, наконец, система формирования и использования фондов охраны природы.

Важнейшим элементом экономического механизма хозяйствования в освоении минеральных ресурсов является система организационно технического развития. Установив спрос на продукцию, каждое предприятие независимо от форм собственности и хозяйствования должно работать над улучшением качества товара, делать его конкурентоспособным на рынке, а совершенствование экологического

законодательства, помимо всего, будет способствовать более эффективному использованию материальных ресурсов, техническому усовершенствованию действующих производств и разработке принципиально новых экологически чистых, малоотходных и безотходных технологий комплексного использования сырья.

Поскольку создание действенного механизма маркетинговой деятельности заключается, прежде всего, в замене директивных методов планирования и регулирования, то организация маркетинговой деятельности в освоении МР практически ничем не будет отличаться от деятельности в других отраслях народного хозяйства.

Основной принцип маркетинга заключается в двуедином, взаимодополняющем подходе к рынку. С одной стороны, это тщательное и всестороннее изучение (потребностей и спроса) нужд потребителей в продукции и услугах. С другой, как правило, активное воздействие на рынок и существующий спрос, на формирование потребностей и покупательских предпочтений. Одним из необходимых элементов экономического механизма по поводу природопользования между соответствующим территориальным исполнительным органом и хозяйствующими субъектами. Они предусматривают условия и порядок освоения ресурсов, права и обязанности пользователя, размеры платежей за пользование природными ресурсами, а также ответственность сторон, возмещение вреда и порядок разрешения спросов.

К основным элементам группы внешнего воздействия экономического механизма материальных ресурсов относятся: финансирование, кредитование, налогообложение, ценообразование, экономическое стимулирование, формирование и использование фонда охраны природы.

Анализ существующего экономического механизма хозяйствования показывает, что он еще во многом неадекватен современному состоянию развития производства. С одной стороны, он не способствует в полной мере повышению эколого-экономической эффективности освоения МР. С другой -не отвечает интересам деятельности предприятий в условиях рыночных отношений.

Поэтому формирование нового экономического механизма эффективного освоения ресурсов должно осуществляться на основе рыночных методов хозяйствования. Рынок – это конкуренция, вызывающая к жизни необходимость разработки экологически чистых, прогрессивных, безотходных и малоотходных технологий, что в конечном итоге ведет к экологизации производства.

В связи с этим основополагающим принципом должна стать экологизация всех мероприятий, связанных с освоением МР, а также всесторонний учет природных особенностей функционирования горного производства в том или ином регионе. (рис. 64) И только после этого следует осуществлять мероприятия по внедрению экотехники, экоуслуг и экоиндустрии. Но для этого необходимо создать соответствующую систему рыночных регуляторов (льготы, кредиты, стимулирование инвестиций и др.) для изменения приоритетов в распределении ресурсов, инвестиций в освоении МР.

Исследования показывают, что в последние годы в Казахстане практически отсутствуют новейшие технологии по переработке отходов. В условиях перехода к рыночным отношениям произошло разрушение существующей системы финансирования, в связи с чем большинство предприятий находятся в тяжелом финансовом положении и не могут производить отчисления средств в фонды природоохранных мероприятий.

Рис. 61. Экономический механизм природопользования

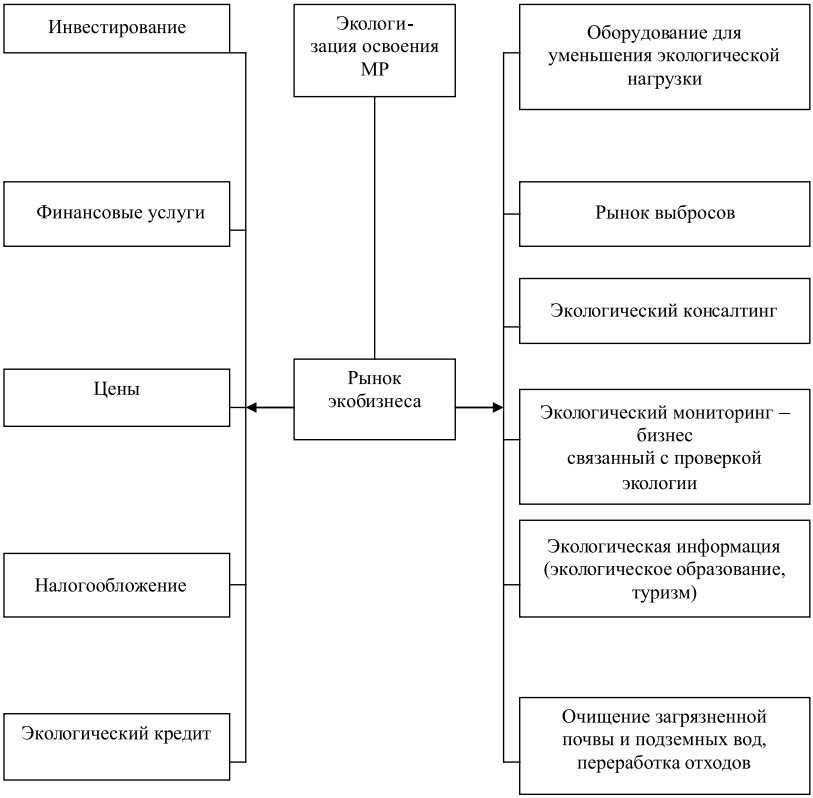


Рис. 62. Экология освоения МР

В этих условиях одним из путей решения экологических проблем является привлечение иностранных инвестиций в реализацию крупных экологических инвестиционных проектов.

Расходы, связанные с ликвидацией ущерба, нанесенного окружающей среде, возмещаются в большинстве случаев не предприятиями загрязнителями, а идут по линии государства. В связи с этим было бы целесообразным создание финансово-кредитной системы в регионе в виде экологического банка. На наш взгляд, данный способ финансирования и кредитования природоохранных мероприятий будет соответствовать рыночным условиям и способствовать рациональному природопользованию. Например, созданная система экологического страхования является одним из направлений для защиты предприятий и организаций от ущерба, причиняемого в результате внезапного, преднамеренного или неожиданного загрязнения окружающей природной среды.

Для создания оптимальных условий экологизации освоения МР необходимо всестороннее изучение природных ресурсов. Сформировать основные требования к созданию эколого-экономического мониторинга: обеспечение необходимой информацией, количественной и качественной характеристик среды; анализ различных видов деятельности людей, воздействующих на окружающую среду; анализ изменений окружающей среды, вызванных этими видами деятельности; влияние изменений в окружающей среде на жизнедеятельность людей; анализ действенности мер по сохранению и улучшению окружающей среды; сравнительный анализ показателей статистики окружающей среды по отдельным регионам.

Эколого-экономический мониторинг позволит получить необходимую информационную базу для разработки соответствующих моделей оптимального управления использованием природных ресурсов и охраны окружающей среды.

В условиях перехода к рыночным отношениям стал формироваться и развиваться рынок экологической сферы. Он объединяет предприятия и организации экологического профиля: по переработке промышленных, бытовых и сельскохозяйственных отходов; производству экологически чистых продуктов питания; защите воздушного и водного бассейна, почвы и повышению ее плодородия, восстановлению численности редких видов животных и растений. Подобные предприятия могут быть государственными, частными, смешанными, а также с привлечением иностранного капитала.

Формирование рынка экологической техники и экологических услуг в регионе представляет собой длительный процесс, основанный на конкуренции товаропроизводителей в экологическом направлении и творческом их стремлении к улучшению использования имеющихся материальных ресурсов. Количество и объемы рынка экологической техники, товаров и услуг будут определяться спросом и предложением.

Развитию рынка экологических и экотехнических услуг способствует развитие рынка информации, без которой невозможно формирование современного рынка. Например, экологическая информация обеспечивает знаниями о состоянии воды, воздуха, фауны и флоры, земли природных зон и о деятельности или факторах, которые оказывают неблагоприятное воздействие

Рынок экологической информации должен развиваться и на международном уровне, поскольку единая система экоинформации позволит оперативно и адекватно оценивать ситуацию.

Основными элементами нового экономического механизма природопользования являются платежи за пользование природными ресурсами, лимиты на их изъятие, выбросы вредных загрязненных веществ и размещение отходов; налоговые кредитные и другие льготы, представляемые предприятиям, организациям, учреждениям и гражданам на проведение эффективных мер по охране природы. Большое значение имеют также планирование и финансирование природоохранных мероприятий. Платежи за пользование природными ресурсами – главный источник финансовых средств для обеспечения охраны, рационального использования и воспроизводства естественных ресурсов.

Планирование мероприятий по охране природной среды и природопользованию должно осуществляться на основе единой государственной экономической программы с учетом природоресурсного потенциала регионов страны. Что

касается финансирования экологических программ и мероприятий по охране природы, то оно проводится как из бюджетов: республиканского, областного, так и за счет средств предприятий, учреждений и организаций, а также из республиканского и местных экологических фондов, фондов экологического страхования, кредитов банков, добровольных взносов населения, иностранных юридических и физических лиц и других источников финансирования и выделяется отдельной строкой в республиканском и других бюджетах, обеспечивается материально-техническими ресурсами [35].

Экономический механизм природопользования включает в себя также обязанность государственных природоохранных органов, служб статистики и природопользователей вести качественный и количественный учет природных ресурсов и вторичного сырья, проводить их эколого-экономическую оценку, а природоохранные органы должны осуществлять ведение государственных земельных, водных и лесных кадастров, а также кадастров недр, живого мира и особо охраняемых природных территорий. Следует при этом иметь в виду, что плата за землю, недра, лес, растительность и животный мир, рекреационные и другие природные ресурсы взимается как за право пользования природными ресурсами в пределах установленных лимитов, так и за сверхлимитное их потребление. Полученные средства расходуются на воспроизводство и охрану природы.

Кроме того, в механизм природопользования входит и плата за загрязнение окружающей природной среды и другие виды воздействия, состоящие из взиманий средств за выбросы и сбросы загрязняющих веществ, размещение отходов и другие загрязнения в пределах и сверх установленных лимитов.

Порядок исчисления и применения нормативной платы за пользование природными ресурсами определяется правительством. При этом внесение мер по охране природы и возмещения ущерба, причиняемого экологическими нарушениями.

Новым элементом экономического механизма природопользования является законодательное закрепление обязательности договорности и лицензирования природопользования. Это означает, что между природопользователем и исполнительным органом области, района, города заключается договор или выделяется лицензия на комплексное использование того или иного вида природных ресурсов на основе заключения экологической экспертизы за предлагаемую хозяйственную или иную деятельность. При этом в договоре предусматриваются условия и порядок использования природных ресурсов, обязанности и права природопользователя, размеры платежей за пользование природными ресурсами и ответственность сторон.

Разрешение (лицензия) на комплексное использование природных ресурсов выделяется государственными органами охраны природы, где указываются их вид, объем, а также экологические требования. Срок достижения нормативных объемов природопользования устанавливается по годам и в соответствии с показателями государственных и региональных природоохранных программ. Для решения неотложных природоохранных задач, восстановления качества окружающей природой среды, компенсации вреда должна функционировать система экологических фондов. Она должна образовываться из средств, поступающих от предприятий, учреждений, граждан, иностранных юридических лиц и граждан.

В том числе за счет платы за выбросы загрязняющих веществ в природную среду, размещение отходов и другие загрязнения, а также из сумм, полученных по искам и возмещении вреда и штрафов, средств от реализации конфискованных орудий охраны и рыболовства, незаконно добытых с их помощью диких животных и средств, полученных в виде дивидендов, процентов по вкладам, банковским депозитам, от долевого использования собственных средств фонда в деятельности предприятий и иных юридических лиц, и граждан.

Причем экологические фонды должны расходоваться только на оздоровление населения, проведения мер и программ по охране природной среды, воспроизводству естественных ресурсов и научные исследования, а также внедрения экологически чистых технологий, строительство очистных сооружений, выплату компенсационных сумм гражданам на возмещение ущерба, причиненного здоровью загрязнением или другим воздействием на природную среду, развитие экологического воспитания и образования. Соответственно должно запрещаться расходование средств экологических фондов на цели, не связанные с природоохранной деятельностью. На случай экологических и стихийных бедствий, аварий и катастроф вводится добровольное и обязательное государственное экологическое страхование предприятий, учреждений, организаций, а также граждан, объектов их собственности и доходов. Порядок экологического страхования и использования этих фондов определяется правительством.

Наряду со страхованием большое место отводится общественным фондам добровольных взносов и пожертвований общественных объединений, других источников и расходуются только на охрану окружающей среды.

Экономический механизм природопользования сводится не только к платности (взиманию платежей), но и поощрению природопользователей и «загрязнителей» среды за активную охрану природы. Такое стимулирование осуществляется через установление различных льгот предприятиям, учреждениям и организациям, в том числе и природоохранным за внедрение, например, малоотходных и безотходных технологий, за активное использование новых безвредных видов энергии, вторичных ресурсов, другой деятельности, обеспечивающей природоохранный эффект. Сюда же можно отнести освобождение от налогообложения экологических фондов, передачу части их средств на договорных условиях под процентные займы предприятиям и гражданам для проведения мер по снижению выбросов загрязняющих веществ, установление повышенных норм амортизации производственных природоохранных фондов, а также применение поощрительных цен и надбавок за экологически чистую продукцию и введение специальных налогов за производство экологически вредной продукции или товаров, выпускаемых с применением экологически опасных технологий. Предусмотрено в этих же целях применение льготного кредитования предприятий независимо от форм собственности, эффективно ведущих охрану окружающей среды. Могут быть установлены и другие виды экономического стимулирования охраны природы, исходя из местных условий и сложившейся экологической обстановки.

Как известно, важной составной частью экономического механизма природопользования является плата за право пользования недрами, землей, животным и растительным миром, другими природными ресурсами. Поэтому правительство

на основании Закона «О недрах» ввело в действие временные минимальные ставки платежей за право добычи (пользования) полезных ископаемых. Такие платежи теперь осуществляются всеми предприятиями и организациями. Предусмотрена и более же сткая ответственность за расточительное отношение к недрам. Если предприятие будет допускать сверх нормативные потери при добыче полезных ископаемых, то ставки платежей увеличиваются в два раза. Разрешено также ставки платежей за недра дифференцировать с учетом природных, географических и других условий в пределах 30% от утвержденных ставок. В целях заинтересованности предприятий в комплексной эксплуатации недр платежи не взимаются с попутно извлеченных веществ при добыче нефти, газа и некоторых других полезных ископаемых, включая вскрышные породы. Эта же льгота представлена и за применение некоторых прогрессивных технологий, например, при добыче нефти термическим, физико-химическим и микробиологическим методами.

Указом Президента РК, имеющим силу закона «О налогах и других обязательных платежах в бюджет» определена плата за земли как сельскохозяйственного, так и несельскохозяйственного назначения. [36] Основанием платы за землю является документ, свидетельствующий о участки. Земельный налог и арендная плата за землю учитывается в доходной и расходной части бюджетов. Это положение направлено на стимулирование землепользователей к бережному и научно обоснованному использованию земель.

Установлено несколько видов платы на землю, в т.ч. земельный налог, нормативная цена земли и арендная плата. На основании этого земледельцы, собственники земли и землепользователи, за исключением арендаторов, ежегодно облагаются налогом. За земли, сданные в аренду, установлена арендная плата. Причем размер земельного налога не зависит от результатов хозяйственной деятельности. Он установлен в виде стабильных платежей за единицу земельной площади. Земельный налог устанавливается с учетом состава угодий, их качества и места расположения.

Одной из составных частей организации рационального природопользования и охраны окружающей среды является нормирование качества природной среды. Оно позволяет устанавливать предельно допустимые нормы воздействия на окружающую среду, способствует сохранению генетического фонда флоры и фауны, обеспечивает экологическую безопасность людей, охрану, воспроизводство и экономное использование природных ресурсов, сохраняя устойчивое развитие народного хозяйства.

В этих целях государственные органы охраны природы, санитарного и эпидемиологического надзора утверждают нормативы предельно допустимых концентрации (ЦЦК) вредных веществ для отдельных регионов, а также вредных биологических веществ (микроорганизмов), загрязняющих окружающую среду (воду, воздух, земли). С их помощью оценивается состояние среды для здоровья человека, животных и растений. Для некоторых наиболее ценных природных территории (заповедники, природные парки, курорты и др.) устанавливаются более жесткие нормативы. Если они нарушаются, то выброс или сброс вредных веществ специальным предписанием органов охраны природы и санэпидемнадзора может быть приостановлен, ограничен или прекращен полностью. Кроме ПДК

нормирование качества окружающей среды предусматривает нормативы ПДВ и ПДС (предельно допустимых выбросов и сбросов) вредных или биологически вредных веществ в окружающую природную среду.

Эти нормативы устанавливаются не отвлеченно, а с учетом производственных мощностей предприятий (объектов), данных о последствиях каждого источника загрязнения в соответствии с действующими нормативами ПДК вредных веществ в окружающей среде.

ПДК и ПДС утверждаются тоже органами природы по химическим веществам и органами санэпидемнадзора по микроорганизмам и другим биологическим веществам. Вводятся и другие нормативы, как допустимый уровень радиационного воздействия, содержание радиационных веществ не только в окружающей среде, но и в продуктах питания в величинах, безопасных для здоровья населения, предельно допустимых уровней шума, магнитных полей, вибраций и других вредных воздействий.

Нормативные объемы сбросов, нормы изъятия природных ресурсов, размещение отходов устанавливаются конкретным предприятиям природопользователям региональными органами экобиоресурсов в соответствии с их компетенцией. Что касается самих нормативов, то они разрабатываются предприятиями – природопользователями с учетом предложений органов местного самоуправления, науки, общественных организаций и населения, а также законодательных актов, экологических ситуаций и программ с тем, чтобы активно содействовать предотвращению нарушения равновесия в природной среде и обеспечению оптимальных условий для жизни людей.

В целях повышения ответственности за охрану природы предприятиям выдается специальное разрешение на выбросы, отходы и изъятия природных ресурсов. Министерство экологии и биоресурсов обязано осуществлять методическое руководство за нормированием сбросов и выбросов, лимитированием природных ресурсов и разрешение отходов. Руководство же этими вопросами на местах должно осуществляться органами местной исполнительной власти совместно с местными органам окружающей среды и санитарно эпидемиологического надзора.

Важный момент в решении экологических проблем – предоставление более широких льгот предприятиям, организациям и лицам при выполнении ими мероприятий по защите экологии. По нашему мнению, целесообразно рассмотрение вопроса об освобождении от налога на добавленную стоимость природоохранных работ и услуг, выполняемых за счет средств экологических фондов. Это послужило бы дополнительным источником решения природоохранных проблем. Представляется обоснованным освобождение от уплаты налога на добавленную стоимость и прибыль заповедники, национальные и дендрологические парки и ботанические сады. Это существенно улучшило бы финансовое положение заповедников. Можно было бы также при исчислении налога с дохода юридических лиц уменьшить налогооблагаемую базу предприятий на сумму средств из собственных источников финансирования, направленных на капиталовложения сокращающих выбросы, сбросы вредных веществ. При сложившейся жесткой финансовой и налоговой политике предприятия получили бы существенную практическую возможность для финансирования мероприятий по охране окружающей среды за счет собственных средств.

2. Анализ и экономическая оценка экологической безопасности Южно-Казахстанской области

2.1. Общая оценка экологической безопасности региона

Современное состояние окружающей среды свидетельствует о том, что экологические проблемы обусловлены двумя основными факторами: расточительным использованием природных ресурсов, которое снижает продуктивность биосферы, и загрязнением, которое угрожает всему живому, в первую очередь благополучию человека и его здоровью. Научно-технический прогресс и обострение социально-экономических проблем способствовал глубокой озабоченности мирового сообщества состоянием окружающей среды и перспективами развития цивилизации. На этой основе 1972 г. в Первой Всемирной конференции по окружающей среде в Стокгольме по устойчивому развитию принята программа о необходимости перехода общества от экономической к эколого-экономической системе развития [1].

Концепция перехода к устойчивому развитию страны предполагает стабилизацию и сокращение уровня воздействия хозяйственной деятельности человека на окружающую среду, а также планомерное, целенаправленное и поэтапное достижение сбалансированного эколого-экономического развития страны. Несмотря на это, рост производства в Республике сопровождается с ежегодным ростом загрязнения атмосферного воздуха (табл. 44) [2].

Таблица 44

2002–2005 гг. ежегодный рост загрязнения атмосферы по Республике Казахстан в целом, в городах и в областях РК

Города и области РК	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2005 г.
Республика Казахстан	20210,7	21734,0	24345,8	24625,2
Акмолинская	310,8	372,6	303,4	407,1
Актюбинская	163,0	182,5	207,0	239,8
Алматинская	798,1	857,9	864,3	832,3
Атырауская	110,5	118,0	94,6	89,5
Западно-Казахстанская	67,3	64,6	97,1	87,6
Жамбылская	71,0	86,6	116,3	117,2
Карагандинская	5878,7	6655,2	7257,3	6824,9
Костанайская	938,0	658,7	1041,7	1064,8
Кзылординская	36,3	20,1	23,7	40,6
Мангистауская	69,5	73,8	57,7	63,6
Южно-Казахстанская	173,5	120,4	162,6	211,0
Павлодарская	9083,9	9956,7	11390,8	11486,1
Северо-Казахстанская	614,5	635,2	715,2	728,0
Восточно-Казахстанская	1159,8	1149,3	1257,5	1648,3
г. Астана	636,7	655,3	666,0	659,8
г. Алматы	99,1	127,1	90,6	124,6

Как видно из табл. 44, с 2002–2005 гг. наблюдается ежегодный рост загрязнения атмосферы как по Республике Казахстан в целом, так и в Актюбинской, Жамбылской, Павлодарской и Северо-Казахстанской областях. Постепенный рост загрязнения с 2003–2005 гг. происходит и в Костанайской, Кзыл-ординской, Южно-Казахстанской и Восточно-Казахстанской области. По данным статистического управления наибольшее количество выбросов загрязняющих веществ в атмосферу по Республике за 2005 год – 11486,1 тыс. т. приходится на Павлодарскую область.

В отчетный период с 2002–2005 гг. доля загрязняющих веществ выброшенного в атмосферу без очистки составил с 8,2–8,9 %., а 2006 г. выброс загрязняющих веществ отходящих от стационарных источников ЮКО без очистки составил 17,2 %.

Доля загрязняющих веществ РК от общего количества загрязнения в последние годы (тыс.тонн) приведены на рис. 63, 64, 65, 66.

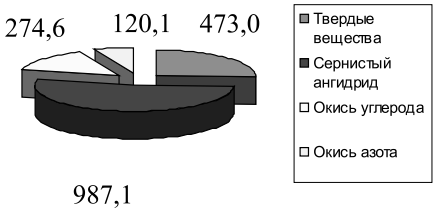


Рис. 63. Доля загрязняющих веществ выброшенных за 2002 г.

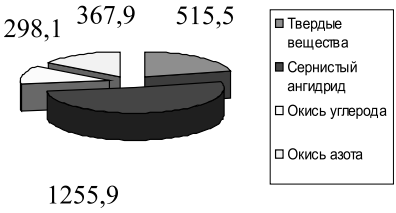


Рис. 64. Доля загрязняющих веществ выброшенных за 2003 г.

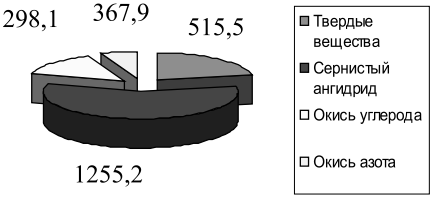


Рис. 65. Доля загрязняющих веществ выброшенных за 2004 г

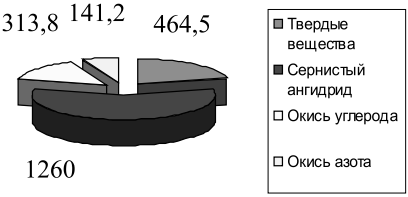


Рис. 66. Доля загрязняющих веществ выброшенных за 2005 г.

Из табл. 45 видно, что самым загрязненным городом Республики является город Балхаш.

Рост выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников наблюдается и в ряде городских администраций и районов Южно-Казахстанской области 2005–2006 гг. (табл 46) [3].

Таблица 45

Ежегодный рост загрязнения атмосферы наблюдается
и в разрезе городов Республики

Города	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2005 г.
Астана	44,5	45,9	44,8	43,9
Алматы	11,2	15,4	12,6	15,5
Актобе	71,3	86,1	104,2	129,1
Усть-Каменогорск	27,6	103,9	96,0	70,7
Зыряновск	3,5	4,3	4,5	4,4
Риддер	11,5	11,2	11,3	11,2
Глубокое	18,6	0,0	1,4	1,6
Атырау	20,5	23,9	15,5	13,7
Актау	0,3	1,6	9,8	27,8
Тараз	7,9	9,0	11,6	12,1
Жезказган	137,3	137,9	147,3	144,4
Балхаш	491,2	718,6	780,8	763,9
Караганда	62,7	59,2	51,6	48,6
Темиртау	338,4	338,9	348,4	320,9
Кзылорда	27,8	15,2	19,9	36,3
Кокшетау	4,3	7,7	7,0	5,5
Костанай	5,9	9,4	5,7	3,0
Аркалык	4,3	4,5	2,8	4,5
Рудный	59,8	76,8	63,9	69,1
Павлодар	103,6	146,9	145,8	150,7
Аксу	144,1	162,3	161,5	148,3
Экибастуз	192,7	194,6	137,2	138,2
Петропавловск	37,0	38,6	42,0	42,1
Семипалатинск	27,0	31,3	32,7	35,6
Талдыкурган	3,9	5,3	5,3	4,5
Уральск	2,0	1,5	2,1	2,1
Шымкент	18,2	23,2	27,9	34,0

Таблица 46

Рост выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников в городских администраций и районов Южно-Казахстанской области 2005–2006 гг

	2005 г.		2006 г.	
	тонн	в % к итогу	тонн	в % к итогу
По области	**36763,1**	**100,0**	**38921,5**	**100**
г. Шымкент	34020,1	92,5	35488,0	91,2
г. Арыс	312,4	0,8	361,9	0,9
г. Кентау	323,4	0,9	346,5	0,9
г. Туркестан	132,8	0,4	134,5	0,3
Казыгуртский район	23,3	0,1	22,1	0,1
Мактааралский район	314,6	0,9	289,0	0,7
Ордабасынский район	41,4	0,1	174,5	0,4
Отырарский район	36,4	0,1	36,4	0,1
Сайрамский район	191,0	0,5	309,0	0,8
Сарыагашский район	221,4	0,6	59,9	0,2
Созакский район	413,0	1,1	460,4	1,2
Толебийский район	298,1	0,8	428,1	1,1
Тулкибасский район	433,2	1,2	809,2	2,1
Шардаринский район	2,0	–	2,0	–

Из приведенных данных видно, что наибольшее количество загрязняющих веществ приходится к промышленным городам, где сосредоточены большое количество источников выброса загрязняющих веществ. Эти источники загрязнения преимущественно оснащены малоэффективными очистными устройствами. Кроме того, до сих пор многие источники загрязнения выбрасывают в атмосферу загрязняющие вещества без очистки. Что свидетельствует неполноценном выполнении промышленными предприятиями положений концепции перехода к устойчивому развитию страны.

Южно-Казахстанская область занимает территорию 117,3 кв. км и включает в себя 11 районов и четыре города (Кентау, Арысь, Туркестан и Шымкент).

Согласно экологического положения и степени загрязнение окружающей среды территорию области можно разделить на следующие категории:

1. Экологическая предопасная территория, т.к. Арысский, Отрарский, Созакский, Шардаринский районы и город Туркестан входит в предэкологический опасной Аральской зоне.

2. Промышленной зоне относится города Шымкент и Кентау.

3. Территория постоянной антропогенной нагрузки, из-за функционирования более двадцати крупных промышленных предприятии цветной металлургии, нефтехимии, строительной индустрии, теплоэнергетики, пищевой промышленности,

сельского хозяйства и других отраслях производства, которые загрязняют атмосферу вредными веществами.

Качество атмосферного воздуха. Контроль атмосферного воздуха города Шымкента производится четырьмя стационарными постами.

Значение предельно-возможной концентрации (ПВК) загрязняющих веществ в населенных пунктах является основным показателем качества атмосферного воздуха.

Годовая концентрация загрязнения загрязняющими веществами города следующий:

- пыли – 2 ПВК;
- формальдегида – 4,7 ПВК;
- диоксид азота – 1 ПВК.

Максимальное значение загрязнения города по ингредиентам зарегистрировано:

- формальдегид – 0,036 мг/м^3 (103 ПВК) в пункте наблюдение загрязнения № 3 находящегося в районе цементного поселка;
- диоксид азота – 0,29 мг/м^3 (3,4 ПВК) в пункте наблюдение загрязнения № 2 находящегося в площади Ордабасы.

По остальным ингредиентам концентрация загрязняющих веществ в норме.

Качества атмосферного воздуха районных центров и городов области определяется передвижной лабораторией Южно-Казахстанской областной гидрометеорологии «Атмосфера-2». Ниже приведены некоторые данные экспедиционной проверки качества атмосферного воздуха.

Ленгер: Источниками загрязнения атмосферы являются автотранспорт, тепловые центры, пищевая производство и индивидуальный жилой сектор. Средняя концентрация пыли в городе 4 раза, формальдегида – 4,3 раза, оксид углерода – 1,0 раза и диоксид азота 1,3 раза выше ПВК.

Арысь: Основными источниками загрязнение являются мелкие производства, тепловой центр, локомотивное депо и жилой сектор. В ходе проверки выявлены концентрации пыли 4,7 раза, формальдегида 4,3 раза и диоксид азота 1,3 раза выше ПВК.

Сарыагаш: Основными источниками загрязнение являются мелкие производства, тепловой центр и жилой сектор. В процессе замера загрязняющих веществ города выявлены превышения ПВК концентрации пыли 4,0 раза, формальдегида – 5,3 раза и диоксида азота 1,0 раз.

Жетысай: Основными источниками загрязнения населённого пункта являются хлопкоочистительный завод, тепловой центр, пищевая производство и жилой сектор. Превышение концентрации загрязняющих веществ наблюдаются по пыли – 4,7 раза, диоксида азота – 1,0 раза, формальдегида 5,3 раза, оксида углерода 1,3 раза.

Шардара: Основными источниками загрязнения являются гидроэлектростанция, автотранспорт, и жилой сектор. Превышение концентрации загрязняющих веществ наблюдаются по пыли – 4,0 раза, диоксида азота – 1,0 раза, формальдегида 5,7 раза.

Основной производственный потенциал Южно-Казахстанской области сосредоточены в городе Шымкенте и в его окрестностях. Основными загрязнителями атмосферы являются АО «Южполиметалл», АО «Петро Казакстан Ойл Продактс», АО «Шымкентцемент», АО «Энергоцентр-3» и другие. Годовые объемы выбросов приведены в табл. 47.

Таблица 47

Годовые объемы выбросов промышленных объектов г. Шымкента

Предприятие	Годовой объем выброса	
	т/год	процент общего объема по области
АО «Петро Казакстан Ойл Продактс»	14254,4	45,8
АО «Южполиметалл»	5761,7	18,5
АО «Шымкентцемент»	1650,9	5,3
АО «Енергоцентр-3»	1568,4	5,04

Согласно статистических данных 2004 года выбросы в атмосферу загрязняющих веществ по области составил 31 тыс. т.

Таблица 48

Динамика загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников, согласно данных областной статистической управлении

	2003	2004
Южно-Ќазаќстанская область	27702,4 т	31075,8 т

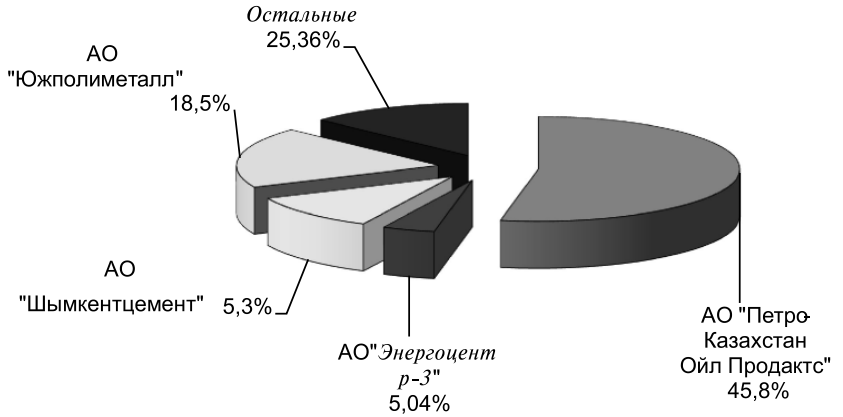


Рис. 67. Вклад загрязняющих атмосферу веществ крупных предприятий г. Шымкента за 2004 год

Ингредиенты и их количества (в тоннах) выбрасываемых в атмосферу загрязняющих веществ за 2003–2004 года по крупным предприятиям приведены в табл. 49.

Согласно рисунку наибольшая доля приходится на летучие органические соединения (42,6%).

Объемы основных загрязняющих вещества (по данным статистической отчетности) города Шымкента приведены в табл. 53.

Таблица 49

Увеличение количества выброса в атмосферу в АО «Южполиметалл» осуществляется из-за увеличения объема производства свинца (2003 г. – 27,4 тыс. т, 2004 г. – 40,8 тыс. т)

АО «Южполиметалл»	2003 г.	2004 г.
Всего	4380,0	5761,4
в том числе		
Неорганическая пыль	148,0	219,8
Свинец	13,7	20,3
Сернистый ангидрид	1635,5	3511,9
Оксид углерода	1326,8	1596,3

Таблица 50

Увеличение количества выброса в атмосферу в АО «Петро Казакстан Ойл Продактс» производится вследствие введения в эксплуатацию нового теплового центра и установки переработки мазута

АО «Петро Казакстан Ойл Продактс»	2003 г.	2004 г.
Всего	12340,7	14254,4
в том числе		
Зола мазута	4,237	4,081
Сернистый ангидрид	325,2	532,0
Диоксид азота	527,7	635,5
Бензол	147,3	153,2
Ксилол	94,5	102,5
Толуол	193,3	215,5
Летучие органические соединения	10129,3	11491,9
Сероводород	14,0	15,5
Аммиак	0,052	0,1

Таблица 51

Снижение выброса загрязняющих веществ в АО «Шымкентцемент» осуществлена за счет установки автоматизированного газоанализатора позволяющего осуществлять непрерывный контроль за газообразными веществами

АО «Шымкентцемент»	2003 г.	2004 г.
Всего	2576,94	1650,94
в том числе		
Пыль клинкера (цемента)	251,89	360,8
Неорганическая пыль	605,1	803,37
Сернистый ангидрид	697,9	105,7
Оксид углерода	710,1	297,6
Оксиды азота	246,9	81,29
Другие ингредиенты	0,1	0,87

Таблица 52

Увеличения количества выбросов в атмосферу в АО «Энергоцентр-3» объясняется увеличением производства электро и теплоэнергии. Производство электрэнергии увеличился с 369592 тыс. квт.ч (2003 год) до 426315,2 тыс. квт.ч (2004 г.)

АО «Энергоцентр-3»	2003 г.	2004 г.
Всего	998,9	1625,7
в том числе		
Сернистый ангидрид	441,9	439,8
Оксид серы	127,96	724,0
Зола мазут	16,25	42,9
Сажа	32,1	30,8
Оксид ванадия	16,0	13,32
Другие ингредиенты	0,002	0,002

Таблица 53

Объемы основных загрязняющих вещества (по данным статистической отчетности) города Шымкента

Загрязняющие вещества	Годовой выброс, тыс. т	
	2003 г.	2004 г.
Диоксид серы	3495,1	5103,0
Оксиды азот	1514,0	1666,4
Оксид углерода	3791,3	4233,7
Твердые вещества	4105,3	4523,7
Летучие органические соединения	11605,7	13235,3

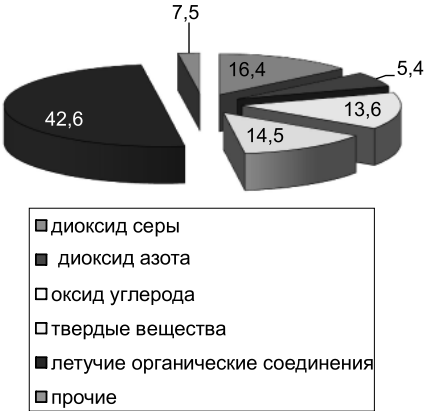


Рис. 68. Доля загрязняющих веществ выбрасываемого в атмосферу от стационарных источников г. Шымкента за 2004 год, %

Состояние водных ресурсов. Предотвращения пресной воды земного шара от загрязнения, его рациональное использования является актуальной проблемой современности.

Ресурсы пресной воды в Казахстане насчитывается 524 км^3, из них 100,5 км^3 приходится к рекам [1].Из этого числа объема воды 56,5 км^3 формируется на территории Казахстана, а 44,0 км^3 объема воды поступает из приграничных республик. В частности, 18,9 км^3– из Китая, 14,6 км^3 – из Узбекистана, 3,0 км^3 – из Киргизстана и 7,5 км^3 – из России

По обеспеченности водными ресурсами среди стран СНГ Казахстан занимает один из последние места и их объемы на 1 км^2 земли и годовая норма на одного человека соответственно составляет 37 тыс. м^3 и 6,0 тыс. м^3 [2].

Загрязнение поверхностных вод производственными отходами предприятии химической, нефтепрерабатывющей, машиностроительной, цветной металлургии и других отраслях промышленности приводит к неблагоприятной экологической состоянии ряда поверхностных вод республики. Кроме того, воды некоторых трансграничных рек загрязненном виде поступающие к Иртыш, Сырдария, Или, Шу и Талас.

Из исследованных 44 водных объектов 6 рек и 1 водохранилище отнеслись к объектам «загрязненный» и «очень загрязненный». Среди объектов «Очень загрязненный» категории относится реки Елек, Нура и Иртыш. В связи с этим приведем индексы загрязнения рек Республики Казахстан [3].

Ориентировочный объем подземных минеральных вод с показателем минерализованности 10 г/л в Казахстана составляет 45 км^3,

Годовой объем потребления воды в Республике Казахстан – 15,1 км^3, из них 14,3 км^3 – пресная вода, 0,63 км^3 – морская вода и 0,18 км^3 – очищенная проточная вода. Основные показатели потреблении и защита водных ресурсов приведены в табл. 56 [3]. Согласно данных потребление воды из природных источников ежегодно повышается.

Таблица 54

Качественное состояние вод основных рек

	Индекс загрязнения воды					
	2001 г.	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2005 г.	2006 г.
Жайык (Урал)	0,79	0,77	0,73	0,74	0,99	0,69
Ертиш (Иртыш)	1,86	1,19	1,18	1,72	1,34	1,2
Сырдария			1,98	1,87	2,12	2,14
Нура	3,12	2,08	1,95	1,9	1,62	1,7
Или	4,68	2,36	1,8	1,55	1,78	2,04
Есиль (Ишим)	1,05	0,9	1,0	0,87	1,08	0,91
Шу	1,43	1,29	1,8	1,93	1,85	2,2
Талас	0,83	0,5	0,63	0,7	1,21	1,52
Тобол	0,55	0,53	0,6	0,66	0,46	0,46
оз. Балхаш	–	3,35	2,6	2,23	2,44	2,2

Таблица 55

Состояние качества поверхностных вод Казахстана по гидрохимическим показателям в 2006 году

Наименование рек	Индекс загрязненности воды		Ингредиенты и показатели качества воды	Средняя концентрация, мг/л	Кратность превышения ПДК	Характеристика качества воды
	2005	2006				
р. Ертис (ВКО)	1,41	1,44	Медь	0,0019	1,9	3 кл. умеренно-загрязнен.
	1,26	0,95	Медь	0,002	2,0	
р. Ертис (Павлодарская)	1,65	1,47	Медь	0,0026	2,6	2 кл. чистая
			Железо общ.	0,25	2,5	
р. Бухтарма (ВКО)	1,4	1,16	Железо общ.	0,19	1,9	3 кл. умеренно-загрязнен
			БПК5	3,2	1,6	
р. Есил (СКО)	1,15	1,23	Азот нитритный	239	2,4	3 кл. умеренно-загрязнен
р. Нура (Акмолинская)	2,09	2,16	БПК5	3,6	1,8	3 кл. умеренно-загрязнен
			Азот нитритный	0,062	3,1	
р. Нура (Карагандинская)	2,44	2,2	Ртуть	0,00019	1,9	3 кл. умеренно-загрязнен
оз. Балхаш (Карагандинская)			Медь	0,009	9,0	3 кл. умеренно-загрязнен
р. Или (Алматинская)	1,78	2,04	Медь	0,007	7,0	3 кл. умеренно-загрязнен
р. Шу (Жамбылская)	1,85	2,2	Медь	0,006	6,4	3 кл. умеренно-загрязнен
			Фенолы	0,002	2,0	

Таблица 56

Основные показатели потреблении и защита водных ресурсов, млн м^2

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Забор воды из природных источников – всего	19830	19695	21105	21856	26436	24796
в том числе из подземных горизонтов	1169	1135	1157	1106	1174	1153
потери воды при транспортировке	4946	4978	5486	6149	3814	3777
Водопотребление (использование воды) – всего	14678	14580	14930	15242	20204	21422
Из них по нуждам:						
Хозяйственные питьевые воды	624	602	600	601	621	694
производственные	3588	3698	3710	3983	4390	4062
Для полива полей и обеспечение села водой	10425	10235	10590	10573	10220	11329
Объем оборотного использование воды	4845	5163	5537	6011	8120	6710
Объем последовательного использование воды	622	593	810	786	412	505
Объем загрянения сточных вод, всего	4056	4081	4215	4466	6955	8954
Из них:						
Поверхностных вод	3404	3326	3450	3594	4229	5623
В том числе без очистки и недостаточно очищенных	155	155	156	77	210	131
в том числе после очистки	35	33	46	15	96	117

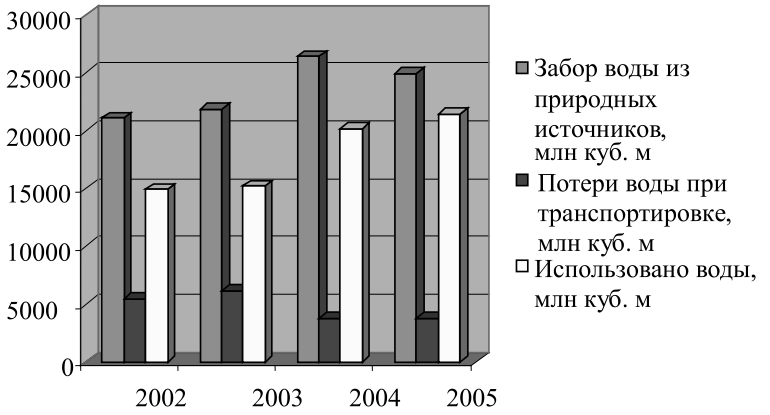


Рис. 69. Забор воды из природных источников и их объемы потребление

Использование воды в основном направлен на сельское хозяйства, производственные нужды и для обеспечения население хозяйственно-питьевой цели (рис. 70) [3].

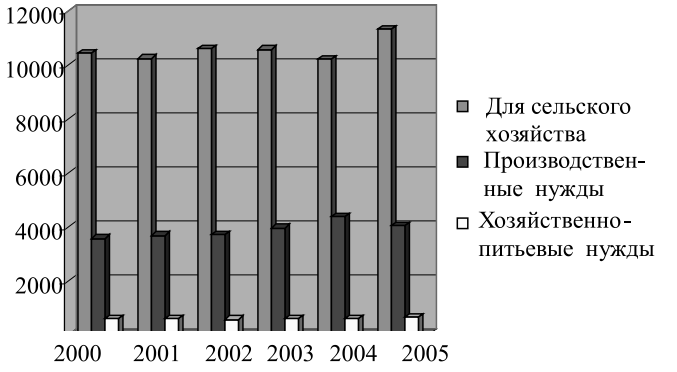


Рис. 70. Основные цели и объемы использование

Объем использование питьевой воды в 2002 году в Республике Казахстан по сравнению с 1995 годом снизился на два раза. В данный момент расход воды на душу населения на сутки составляет 150 литров. Объем потребление питьевой воды сельских районов Республики по сравнению городскими жителями три раза ниже.

Имеется место направление загрязненной и неочищенной воды на поверхностные объекты водных ресурсов (рис. 71).

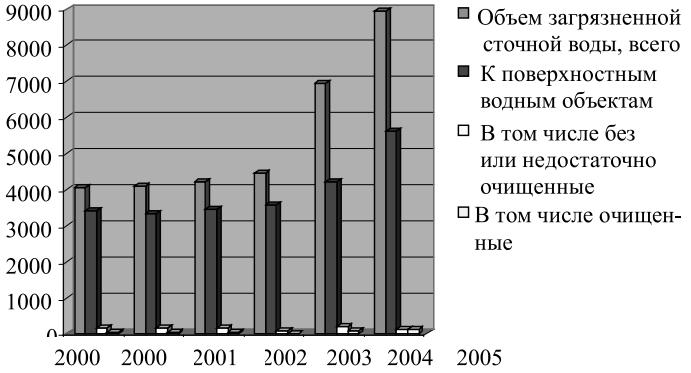


Рис. 71. Сброс сточных вод

В настоящее время проводится работы для решения задач по очистке водных ресурсов и дефицита воды, которые финансируется республиканским бюджетом. Кроме того для защиты водных ресурсов и их рационального использования

направлены зарубежные и отечественные инвестиции. К сожалению ежегодное увеличения инвестиции на охрану водных ресурсов и их рациональное использование по сравнению с инвестицией окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов не наблюдается (рис. 72) [3].

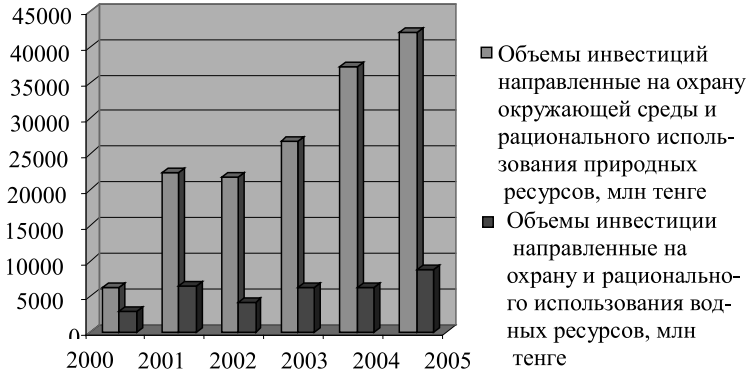


Рис. 72. Инвеститции направленные на охраны окружающей среды и водных ресурсов

Согласно сведением приведенным в Государственной программе 2004–2010, направленный на развитие сельских регионов в 637 населенных пунктах качество воды не соответствует требуемым нормам. В настоящее время проводится ряд работ по достижению показателей питьевой воды до санитрно-эпидемиологических норм. В соответствии с этим доля показатели воды несоответствующие по санитарно химическим и микробиологическим показателем ежегодно уменьшается (табл. 57).

Таблица 57

Доля воды несоответствующая нормативам, %

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
По санитарно химических показателям	11,1	12,7	11,4	8,8	7,5	6,0
По микробиологическим показателям	10,1	8,5	9,5	8,1	7,6	6,9

На территории Южно-Казахстанской области основными поверхностными водными источниками являются реки: Сырдарья, Келес, Бадам, Арысь, Бугунь, Сайрамсу. Бассейны рек расположены в трех зонах: горной, предгорной и равнинной. По условию питания реки носят смешанный характер, т.е. грунтово-снегодождевой. Преобладание весенних осадков, выпадающих в виде дождей с весенним снеготаянием, образуют основной весенний паводок в реках. Всего же на территории области насчитывается 118 малых рек (протяженность от 10 до 200 км), 28 водохранилищ и 25 озер.

Основными загрязнителями поверхностных и подземных вод являются предприятия:

– цветной металлургии;
– нефтехимической;
– химической;
– легкой и пищевой промышленности,
– и пр.

Основными загрязняющими веществами являются:

– неорганические формы азота;
– сульфаты;
– нефтепродукты;
– фосфаты.

Бассейн реки Сырдарья: Характеристика химического состава реки Сырдарья осуществлялась по данным тринадцати гидропостов. На участке в районе с. Кокбулак вода поступает с большим количеством загрязняющих веществ. Основными загрязняющими веществами являются сульфаты, нитриты, медьи магний. Их максимальный уровень превышал норму по сульфатам – 15,5 раза, по нитритам – 3,8 раза, по меди – 9 раза и по магниям – 3,7 раза. Среднегодовые концентрации этих веществ превышали норму от 1,00 до 4,9 ПДК. Максимальный уровень загрязнении наблюдался в весенний период.

Индекс загрязнения воды (ИЗВ) по гидропостам находился в пределах от 0,27–4,76.

Общий индекс загрязнения воды составил – 2,07 и относится к 3 классу, умеренно-загрязненная.

Река Сырдарья: Непосредственно по реке Сырдарья расположены семь гидропостов. По результатам химических анализов воды реки загрязнена сульфатами, медью, нитритам и магнием.

Среднегодовые концентрации этих веществ превышали норму от 1,45 до 5,2 ПДК. Максимальные значения сульфатов превышало норму 7,6 раза, меди 5 раза, нитритов 5,6 раза и магния 2,4 раза.

Индекс загрязнения воды (ИЗВ)по гидропостам реки Сырдарья находился 1,10–5,3. Общий индекс загрязнения воды составил – 2,17 и относится к 3 классу (умеренно-загрязненная).

Вдхр. Шардаринское: Вода Шардаринского водохранилища загрязнена сульфатами, нитритами, медью и магнием. Их среднегодовые концентрации превышали допустимую норму от 1,2 до 5,0 ПДК. Максимальное содержания сульфатов 7,7 ПДК, нитритов 2,2 ПДК, меди 8 ПДК и магния 2,9 ПДК

Индекс загрязнения воды (ИЗВ) – 2,11, что относится к 3-му классу, умеренно-загрязненная.

Река Келес: В верхнем течении реки (с. Акжар) среднегодовые концентрации основных загрязняющих веществ находились в пределах нормы. К устью реки качество воды ухудшается, что связанно с интенсивным развитием орошаемого земледелия и животноводства. Максимальное содержание сульфатов превышало норму в 15,5 раз, меди в 9 раз, магния

3,6 раза и нитритов в 2,7 раза. Состояние воды по сравнению с прошлым годом ухудшилось

Индекс загрязнения воды (ИЗВ) составил – 3,31, и относится к 4 классу, загрязненная.

Река Бадам: Уровень загрязнения реки установлен по результатам химического анализа воды двух гидропостов расположенные по реке Бадам (г/п г. Шымкент и г/п аул Караспан). Основными загрязняющими веществами являются сульфаты, нитриты, медь и магний. Среднегодовые концентрации этих веществ превышало норму от 1,0 до 5 ПДК. Максимальное содержание меди в районе гидропоста г. Шымкент (0,64 км ниже ЗАО «Южполиметалл») превышало норму 8 раза, что связано с подземными водами, которые имеют тесную гидравлическую связь с поверхностными водами. Сульфаты превышали норму 3,5 раза (аул Караспан), нитриты 2,2 раза (г/п Шымкент), магний 2,1 раза (г/п Шымкент). Рост концентраций примесей отмечался весенний период, во время смыва с поверхности земли загрязняющих веществ дождевыми потоками. Остальные ингредиенты находились пределах допустимой нормы

Индекс загрязненности воды составил (ИЗВ) – 1,72 что относится к 3 классу, умеренно – загрязненная.

Река Бугунь: Река относится к числу не загрязненных. Содержание некоторых ингредиентов обнаружено в пределах 0,4–1,0 ПДК.

Индекс загрязненности воды (ИЗВ) составил – 0,64 и относится к 2 классу, чистая.

Река Катта-Бугунь: Вода реки относится к категории «чистая» Индекс загрязненности воды составило – 0,48, что относится ко 2 классу, чистая.

В течение 2005 года обнаружено 11 ВЗ. Содержание сульфатов в реке Келес превышали ПДК: в январе –12,0 ПДК, феврале 14,7 ПДК, марте – 14,8, мае 12,8 ПДК, июне 11,7 ПДК, июле 12,7 ПДК, августе 15,5 ПДК, сентябре – 14,3 ПДК, октябре – 12,4, ноябре – 14,2 ПДК и декабре – 13,4 ПДК.

По остальным ингердиентам ВЗ не обнаружено.

Очистные сооружения. По области взято на учет 49 очистных сооружения. ПДС разработаны для 29. Имеются 30 выпусков в водные объекты, из них КДС – 19. В настоящее время из существующих очистных сооружений большая часть не работает в связи с простоем производства. Из них 10 имеют выпуски в горколлектор, 39 – в водоемы, на ЗПО, поля фильтрации, накопители, неэффективно работают 3 очистных сооружения.

Областной центр имеет очистные сооружения, мощностью 197 тыс. $м^3$/сут., при фактической нагрузке – около 100 тыс. $м^3$/сут, которые находятся на балансе ТОО «Водные ресурсы – маркетинг». Емкость – 25 млн м. куб. Отводимые сточные воды – смешанные: коммунально-бытовые и производственные. После очистки стоки отводятся в Буржарский накопитель.

Земельные ресурсы. По данным областного Комитета по управлению земельными ресурсами территория области составляет 11724,9 тыс. га. Существенных изменений в структуре земель Южно-Казахстанской области за 9 месяцев 2006 г. не произошло.

Таблица 58

Категория земель

Категория земель	Всего земель	В т.ч. с/х угодий	Из них						
			пашни		Много-летние на-саждения	Залежи	Сено-косы	Паст-бища	Огороды, служебные наделы
			всего	В т.ч. оро-шенные					
Земли с/хоз. назначения	4448,9	4103,7	766,2	381,4	19,9	149,3	119,3	3048,9	0,1
Земли населенных пунктов	655,6	572,0	33,7	28,6	9,5	2,6	0,1	525,9	0,2
Земли промышлен., транспорта, связи, обороны и иного не с/х назначения	47,7	1,9	0,2	0,2	0,3	0,1	–	1,2	0,1
Земли особо охраняемых природных территорий	76,3	37,6	0,2	–	–	–	1,2	36,2	–
Земли лесного фонда	3036,9	2442,6	0,1	0,1	0,8	0,1	11,5	2430,1	–
Земли водного фонда	134,0	1,4	0,1	0,1	–	–	–	1,1	0,1
Земли запаса	3326,4	3109,9	32,5	13,0	0,3	38,2	10,6	3028,3	–
Итого земель	11725,8	10269,1	833,0	423,4	30,9	190,3	142,7	9071,7	0,5
Земли используемые за пределами респу-блики	0,9	0,7	0,1	–	–	–	0,4	0,2	–
Территория области	11724,9	10268,4	832,9	423,4	30,9	190,3	142,3	9071,5	0,5

Таблица 59

Качественная характеристика сельскохозяйственных угодий

Мелиоративные группы	Сельхозугодия		В т.ч. пашня	
	Площадь, тыс. га	Удельный вес в %	Площадь, тыс. га	Удельный вес в %
Всего обследовано земель	10254,6	100	840,1	100
Из них – не осложненные отрицательными признаками	1872,6	18,3	504,3	60,0
В т.ч. безусловно пригодные для земледелия	727,8	7,1	493,0	58,1
защебненные	1081,8	10,5	7,4	0,9
засоленные	2222,5	21,7	158,6	18,9
солонцеватые	1009,5	9,8	6,8	0,8
Подверженные ветровой эрозии	3108,7	30,3	0,3	0,02
Подверженные водной эрозии	950,2	9,3	162,0	19,3
переувлажненные	1	0,01	0,7	–
заболоченные	1,8	0,02	–	0,08
прочие	6,2	–	–	–

Таблицы 60

Эрозия почвы

№ п/п	Наименование районов и городов	Дефляционно-опасные земли	Подвержено ветровой эрозии	Подвержено водной эрозии, тыс. га
1	Байдыбекский	584,7		243,9
2	Казыгуртский	340,3	0,5	196,1
3	Махтааральский	12,5		
4	Ордабасинский	211,6		67,8
5	Отрарский	1301,6	858,6	10,4
6	Сайрамский	146,6		58,6
7	Сарыагашский	700,6	64,3	156,7
8	Сузакский	3770,5	1043	51,3
9	Толебийский	205,8	–	63,7
10	Тюлькубасский	160,6	–	40,2
11	Шардаринский	1061,2	955,5	0,2
12	г. Арысь	412,8	168,9	10,8
13	г. Кентау	43,5	–	–
14	г. Туркестан	393,3	17,9	43,7
15	г. Шымкент	16,9	–	6,8
	Итого по области	9362,5	3108,7	950,2

Площадь нарушенных земель (в разрезе районов и городов области). Площадь нарушенных земель в области, представленная карьерами, внутренними и внешними отвалами, утратившими свое значение каналами, открытыми дренажами составляет 1735 га, в том числе:

– Сайрамский	164,0
– Сарыагашский	32,0
– Сузакский	584,0
– Толебийский	211,0
– Тюлькубасский	244
– Кентау	420
– Туркестан	54
– Шымкент	26

Существенных изменений в площадях нарушенных земель нет.

Работы по рекультивации земель не проводились.

5. Твердые промышленные и бытовые отходы. В начале третьего тысячилетия охрана окружающей среды представляет собой проблему, к которой приковано всеобщее повышенное внимание. Актуальность проблемы нарастает вместе с ростом мировых объемов производства и накоплением производственных отходов в окружающей среде. Сегодня в решении этой проблемы реализуются в основном технические и технологические возможности. Этими средствами можно добиться некоторого улучшения состояния окружающей среды в каком-то конкретном регионе, однако, их недостаточно для решения проблемы загрязнения в целом по стране. Проблема в целом может быть решена только при комплексном анализе всей совокупности экономических и экологических процессов, который дает возможность не только формировать программы по обезвреживанию производственных отходов, но и управлять самим процессом возникновения техногенного загрязнения, его отраслевой и территориальной структурой.

Серьезная проблема накопления отходов стоит и по Республике Казахстан. Согласно данным приведенным в табл. 61 [1] накоплено 228243 млн т токсичных отходов. Наибольшее количество отходов накоплено в Костанайской области, где сосредоточено около 52 % объемов накопления токсичных отходов Республики. Кроме того, хотелось бы отметить ежегодный рост накопления этих отходов, который свидетельствует о низком уровне их использования и подтверждается данными табл. 62, где приведены объемы использования и обезвреживания токсичных отходов образованных в Республике.

По данным табл. 62 [1] видно, что вовсе не используются и необезвреживаются отходы образованные в городах Астаны и Алматы, Алматинской и Кзылординской областях. Крайне неудовлетворительно используются и обезвреживаются токсичные отходы и в Южно-Казахстанской области.

Накапливающиеся за время деятельности предприятий ЮКО опасные промышленные отходы оказывают серьезные вредные воздействия на экологическую обстановку. На конец 2006 года на предприятиях области накоплено 14,8 млн т токсичных отходов производства. Свыше 90,3 % (13,3 млн т) от общего их объема сосредоточено в Кентау [2].

Таблица 61

Серьезная проблема накопления отходов стоит и по Республике Казахстан

Города и области	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2005 г.
	млн т	млн т	млн т	млн т
Республика Казахстан	137082	141946	146117,0	228243
Акмолинская	251	348	184,0	204
Актюбинская	17857	29091	13828	15105
Алматинская	1179	1092	1047	1042
Атырауская	94	62	71,0	65
Западно-Казахстанская	50	54	152	218
Жамбылская	26	27	109	55
Карагандинская	44650	42463	40955	54031
Костанайская	16782	18948	37746	118179
Кызылординская	0,0	0,0	0,0	8
Мангистауская	118	163	146	179
Южно-Казахстанская	72	34	50	78
Павлодарская	9688	10756	12137	11885
Северо-Казахстанская	592	610	684	705
Восточно-Казахстанская	45024	37549	38285	25742
г. Астана	618	642	648	644
г. Алматы	81	107	75	103

Таблица 62

Объемы использования и обезвреживания токсичных отходов образованных в Республике

Города и области	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2005 г.
	млн т	млн т	млн т	млн т
1	2	3	4	5
Республика Казахстан	34911	32757	30360	18939
Акмолинская	1	0,0	0,0	0,0
Актюбинская	213	3915	5864	5418
Алматинская	–	–	–	–
Атырауская	15	10	43	6
Западно-Казахстанская	4	8	172	200
Жамбылская	16	14	11	5
Карагандинская	5765	5031	3797	3854

Окончание табл. 62

1	2	3	4	5
Костанайская	58	66	77	102
Кызылординская	0,0	0,0	0,0	4
Мангистауская	87	37	40	97
Южно-Казахстанская	–	1	1	1
Павлодарская	1107	1130	1028	1006
Северо-Казахстанская	4	4	5	5
Восточно-Казахстанская	27641	22541	19322	8241
г. Астана	0,0	–	–	–
г. Алматы	0,0	0,0	0,0	0,0

Согласно данным об образовании и накоплении токсичных отходов всех классов опасности на предприятиях ЮКО в 2005–2006 гг. наибольшее количество отходов приведенным в табл. 63 [2] относятся к IV классу опасности.

В 2006 году, в сравнении с 2005 годом, образования всех видов токсичных отходов на предприятиях области в результате их производственной деятельности увеличилось в 2,3 раза.

В 2006 году в местах организованного складирования и захоронения направлено 176,5 тыс. т токсичных отходов, (что в 2,8 раза больше, чем в 2005 году), из них твердые отходы составляют – 94,1%, пастообразные – 5,9%.

Таблица 63

Данные об образовании и накоплении токсичных отходов всех классов опасности на предприятиях ЮКО в 2005–2006 гг.

	Образовалось отходов на предприятиях за год, т		2006 г. в % к 2005 г.	Наличие отходов на конец 2006 г., тыс. т	Удельный вес в общем объеме, %
	2006 г.	2005 г.			
Всего отходов всех классов по области	176659,4	78215,8	2,3 р.	14794349,9	100
В том числе:					
I кл. опасности	–	–	–	–	–
II кл. опасности	905,7	1607,4	56,3	58201,7	0,4
III кл. опасности	38413,3	514,1	75 р.	973211,4	6,5
IV кл. опасности	137340,4	76094,3	1,8 р.	13762936,8	93,1

Приведенные данные по токсическим отходам, как по Южно-Казахстанской области, так и по Республике в целом дают основания о необходимости применения скорейших мер по их использованию и утилизации.

Шымкентская городская свалка твердо-бытовых отходов находится за чертой города в северо- восточной части. Общая площадь, занимаемая отходами производства составляет более 500 га. За 9 месяцев 2006 г. на свалке города

Шымкента по предварительным оценкам порядка образовалось и вывезено на городскую свалку 190 тыс. м^3 твердых бытовых отходов.

Переработка ТБО не производится.

Таблица 64

Структура поступающих на экспертизу материалов по отраслям экономики

Отрасли экономики	2004 г.	2005 г.
Агропромышленный комплекс	10	75
Транспортная инфраструктура	3	16
Связь, телевидение, радио	4	1
Машиностроение	0	3
Добыча руд, черная и цветная металлургия	74	115
Стр-во и промышленность строительных материалов	12	98
Легкая промышленность	11	35
Пищевая промышленность	5	48
Газовая и нефтеперерабатывающая промышленность	54	82
Энергетика	12	33
Коммунальное хозяйство	114	151
Государственные, банковские учреждения	27	122
Образование, здравоохранение и культура	1500	1028
Малый и средний бизнес	1577	1820
Атомная промышленность	29	38
Химическая промышленность	2	8
ВСЕГО	3434	3673

Как видно из табл. 64, наибольшее количество материалов относится к малому, среднему бизнесу и образованию, здравоохранению и культуре. Практически по всем отраслям экономики отмечается увеличение поступления материалов на экспертизу по сравнению с 2004 г.

В число наиболее крупных и значимых проектов входят:

Материалы «ОВОС при работе 4-х вращающихся печей на угольном топливе АО "Шымкентцемент"». Основная задача технического перевооружения, рассматриваемого в экспертируемых материалах вызвана переводом топливной системы существующих клинкерных (вращающихся) печей №4 и 6 с природного газа на уголь Шубаркульского разреза. Ранее, заключением №03–05–09/4031 от 24.12.2002 г. МООС РК был согласован перевод обжиговых печей №3 и 5 на уголь. В настоящее время эти вращающиеся печи предприятия используют в качестве топлива уголь, 4 печи используют в качестве топлива газ и мазут. С реализацией проекта в атмосферу будет выбрасываться дополнительно пыль угля в количестве 1,4329 т/год (0,0733 г/с). Но за счет замены систем пылеочистки на клинкерных холодильниках ожидается снижение выбросов загрязняющих веществ на 59,8766 т/год (13,1242 г/с). В соответствии с предложениями

и замечаниями ЮКОТУООС № 05/3905 от 9.09.2005 г., с целью снижения концентрации группы суммации всех пылей, проектом сокращено количество действующих источников загрязнения атмосферы (цементные мельницы до 5, сушильные барабаны до 2, деревообрабатывающие станки до 6, металлообрабатывающие станки до 6, посты погрузки цемента до 4, силоса цемента до 7) (согласован).

Проект обоснования инвестиций «Хозпитьевое водоснабжение и канализация г. Шымкента до 2015 года». Обоснованием инвестиций предусматривается: продолжение строительства зонной системы водоснабжения (расширение и реконструкция водопроводных сетей и водоводов), намеченной предыдущими работами. Вода от водозаборов (Акбай-Карасуйский, Тассайский № 2, Кумыш-Булакский № 3) по двум водоводам подается в зональные резервуары с последующей независимой подачей воды в сеть каждой зоны города; реконструкция существующих канализационных сетей и коллекторов, капремонт и восстановление существующих канализационных очистных сооружений, расширение сооружений биологической очистки и др. Принят вариант, предусматривающий полную биологическую очистку стоков, их глубокую доочистку на биопрудах с высшей водной растительностью. Дополнительно предусматривается обеззараживание доочищенных сточных вод по УФ технологии (согласован).

Отчет о научно-исследовательской работе: «Мониторинг воздействия на окружающую среду гранулированных шлаков свинцового завода АО «ПК «Южполиметалл». Определение классов опасности гранулированных шлаков». В представленных на экспертизу материалах исследовался гранулированный шлак, отправляемый в накопитель, находящийся на территории завода, и служащий сырьем для цинкового производства. Открытый склад гранулированных шлаков расположен в юго-западной части завода в виде шести самостоятельных терриконов общей площадью около 4,5 га. Объем хранимого гранулированного шлака в накопителе на 01.01.2005 г. составляет 875 тыс. т. Всего с 1999 года образовано и хранится 245 тыс. т шлака. Объем ежегодного образования шлака составляет 60 тыс. т. В перспективе предполагается ежегодная переработка 145,2 тыс. т шлака (согласован).

Проект санитарно-защитной зоны УМГ «Южный». Проектом предусмотрены мероприятия по благоустройству санитарно-защитных зон. Для посадки на территории предприятий рекомендованы следующие породы деревьев и кустарников: белая акация, береза бородавчатая, береза пушистая, бересклет бородавчатый, сперея иволистная, спирея средняя, терн колючий, тополь душистый, тополь лавролистый, тополь серебристый, туя западная, черемуха виргинская, черемуха обыкновенная, боярышник красный, бузина красная, вяз гладкий, дуб летний, ель колючая, ива и др. Для объектов I класса санитарно-защитная зона должна быть озеленена не менее 40 % ее территории, II и III класса – не менее 50 % (согласован).

Проект «Оценка существующего уровня загрязнения окружающей среды промышленными отходами АО «Промышленная корпорация «Южполиметалл». В проекте рассматриваются следующие виды отходов АО «ПК «ЮПМ»: металлургический комплекс – шлак после фьюмингования (шлакоотвал), оборотный кек (кеконакопитель); теплоэнергетическое предприятие – золошлак (золоотвалы ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2); Кентауская обогатительная фабрика – отвальные хвосты (хвостохранилище); рудник «Ачисай» – клинкер (отвал рудника); на всех промплощадках – металлолом, ТБО (согласован).

Таблица 65

Пояснительная записка по пункту 58

№ п/п	Наименование	Проведено проверок (количество)	Выявлено нарушений (количество)	Выдано предписаний (количество)	Из них исполнено (количество	Предъявлено претензий (кол./тыс. тенге)	Их них исполнено добровольно (кол./тыс.тенге)	Предъявлено штрафов (кол./тыс. тенге)	Из них исполнено добровольно (кол./тыс. тенге)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Охрана земель	380	89	183	129			56/ 692,322	57/83,671
2	Охрана водных ресурсов	500	182	333	174	18/2409,25	15/860,412	93/1441,761	90/1434,759
3	Охрана атмосферного воздуха	864	379	655	444	30/2187,747	32/1651,576	290/4650,435	298/4722,18
4	Охрана недр	115	48	79	40	3/15,6	2/12,7	25/203,72	23/182,38
5	Охрана растительного мира	1		5	3				
6	Охрана животного мира	1							
7	Радиационная безопасность	16	2	5	3			1/19,42	1/19,42
8	Отходы производства и потребления	834	297	592	354	24/4002,096	24/134,875	206/2028,221	193/1902,263
9	Использование средств химизации	11		8	7				
10	Охрана континентального шельфа РК								
11	Итого:	2722	997	1860	1154	75/8615,557	73/6659,563	671/9035,879	662/9044,673

Таблица 66

Оценка существующего уровня загрязнения окружающей среды

	Наименование	Внесено предложение об аннулировании лицензии разрешении	Из них исполнено лицензии разрешении	Судебное производство					
				Направлено дел в суд на приостановление объекта (количество)	Из них удовлетворено судом (кол-во)	Направлено исков в суд о взыскание ущерба кол-во тыс. тенге	Из них удовлетворено судом кол-во тыс. тенге	Направлено исков в суд о взыскание штрафа кол-во тыс. тенге	Из них удовлетворено судом кол-во тыс. тенге
		11	12	13	14	15	16	17	18
1	Охрана земель			3	3	2/518,108	2/518,108		
2	Охрана водных ресурсов	2	2	6	4	9/5570,19	9/6068,587	3/131,54	3/131,54
3	Охрана атмосферного воздуха	2		6	4	4/9622,21	4/9622,21	3/126,23	3/126,23
4	Охрана недр			2		1/1500,82	1/1500,82	1/144,68	1/144,68
5	Охрана растительного мира								
6	Охрана животного мира								
7	Радиационная безопасность								
8	Отходы производства и потребления					6/20058,243	6/44019,3	2/168,95	2/168,95
9	Использование средств химизации								
10	Охрана континентального шельфа РК								
	Итого:	4	2	17	11	22/37269,571	22/61729,025	9/571,4	9/571,4

За 2005 года экологической инспекцией проведено 2722 проверок (2699 – за 2004 г.), в т.ч. по сферам охрана атмосферного воздуха – 864 (962), охрана водных – 500 (649), охрана недр – 115 (–), охрана земельных ресурсов – 380 (344), размещение и утилизация отходов – 834 (725), радиационная безопасность – 16 (19), охрана растительного мира 1 (–), охрана животного мира 1 (–), использование средств химизации 11 (–).

В ходе контрольно-инспекционной деятельности выявлено 997 (1752) нарушения природоохранного законодательства, в т.ч. по сферам охрана атмосферного воздуха – 379 (699), охрана водных – 182 (377), охрана недр – 48 (–), охрана земельных ресурсов – 89 (211), размещение и утилизация отходов – 297 (436), радиационная безопасность – 2 (29).

Наиболее распространенными нарушениями являются:

– в части охраны атмосферного воздуха и радиационной безопасности – нарушение Правил эксплуатации пылегазоочистного оборудования и аспирационно-вытяжных систем, сверхнормативный выброс загрязняющих веществ в атмосферу, реконструкция и строительство объектов без наличия заключения госэкологической экспертизы, отсутствие инструментального контроля источников выбросов на предприятий по соблюдению установленных нормативов предельно-допустимых выбросов, отсутствие производственного мониторинга и контроля и т.д.;

– в части охраны недр, водных ресурсов – ненормированные сбросы, нарушение правил внесения платежей за загрязнение окружающей среды, самовольное загрязнение окружающей среды, невыполнение контрактных условий недропользователями, в части экологических требований и т.д.;

– в части охраны земельных ресурсов: загрязнение земель отходами производства и потребления, химическими веществами и материалами, сточными водами, порча, засорение земель;

– в части размещения и утилизации отходов: нарушение правил складирования отходов, размещение производственных и бытовых отходов в не отведенных и необорудованных местах.

Из выявленных 379 нарушений в области охраны атмосферного воздуха: на нарушение стандартов, норм и экологических требований приходится – 240 (63,3%); выбросы загрязняющих веществ без разрешения – 83 (22%); нарушение правил эксплуатации оборудования для очистки выбросов в атмосферу – 14 (3,6%); превышение нормативов предельно-допустимых выбросов в атмосферу – 17 (4,5%); невыполнение требований законодательства об обязательном прохождении государственной экологической экспертизы – 17 (4,5%); эксплуатация автотранспортных средств и других передвижных средств с превышением нормативов содержания загрязняющих веществ в выбросах – 5 (1,3%); Ввод в эксплуатацию предприятий без соблюдений требований по охране атмосферного воздуха – 1 (0,3%) и выпуск в эксплуатацию транспортных и других транспортных средств с превышением нормативов содержания ЗВ в выбросах – 2 (0,5%).

По охране водных ресурсов из выявленных 182 нарушений на нарушение стандартов, норм и экологических требований приходится – 112 (61,54%), невыполнение требований законодательства об обязательном проведении государственной экологической экспертизы – 15 (8,24%), отсутствие разрешения на

сброс сточных вод – 21 (11,54%), превышение нормативов предельно-допустимых сбросов сточных вод – 17 (9,34%), нарушение правил сброса сточных вод – 17 (9,34%).

По охране недр из выявленных 48 нарушений на нарушение стандартов, норм и экологических требований приходится – 39 (81,25%), на нарушение экологических норм и правил при использовании недр – 9 (18,75%).

По охране земельных ресурсов из выявленных 89 нарушений являются: нарушением стандартов, норм и экологических требований – 67 (75,28%), порча земли – 11 (12,36%), невыполнение требований об обязательном проведении госэкологической экспертизы –11 (12,36%) .

По контролю за размещением и утилизацией отходов из выявленных 297 нарушении являются: нарушение правил и норм экологических требований – 78 (26,3%), нарушение правил размещения отходов производства и потребления – 123 (41,4%), нарушение правил учета, утилизации и обезвреживания отходов – 4 (1,4%), размещение отходов без разрешения – 87 (29,3%), не соблюдение требований при складировании и сжигании промышленных и бытовых отходов – 5 (1,6%).

Анализ основных показателей контрольной деятельности показывает, что из 997 выявленных нарушений за 2005 года на долю предприятий агропромышленного комплекса приходится – 126, добычи руд, черной и цветной металлургии – 111; строительства и промышленности строительных материалов – 84; нефтеперерабатывающей промышленности – 13; электротеплоэнергетики – 23; коммунального хозяйства – 50; малый средний бизнес – 132; железнодорожная отрасль – 22; пищевая промышленность – 39; вооруженные силы – 32; автотранспорт – 23; образование – 67; здравоохранение – 39 и другие – 336.

Особое негативное влияние на окружающую среду оказывают предприятия теплоэнергетики, коммунального хозяйства, агропромышленного комплекса.

Типичными примерами нарушений являются самовольное загрязнение окружающей среды. Так, за сброс неочищенных канализационных стоков в реку Бадам и на рельеф местности в р-не ст. Казыгурт предъявлены иски ТОО «Водные ресурсы-Маркетинг» на сумму 2810 тыс. тенге. За сброс коллекторно-дренажных вод в р. Сырдарья без разрешения на спецприродопользование предъявлены иски РГП «Югводхоз» на общую сумму 901,301 тыс. тенге. За аварийный сброс сточных вод на рельеф местности предъявлен иск ТОО «Тамшы» на сумму 395,017 тыс. тенге. В настоящее время указанные исковые заявления удовлетворены судом. За сброс сточных вод на поля фильтрации без оформленного в установленном порядке разрешения на природопользование предъявлен иск филиалу РГП «Кентауликвидрудник» – «Кентауводхоз» на сумму 583,576 тыс. тенге. исковое заявления удовлетворено судом.

Также в области охраны атмосферного воздуха наиболее типичными примерами нарушений является самовольный выброс загрязняющих веществ в атмосферу. За 9 месяцев 2005 года по указанному нарушению предъявлено 10 претензий на общую сумму 1092,807 тыс. тенге.

В части загрязнения земель направлено 2 иска в суд к цеху по переработке шкур филиала «Санде» на общую сумму 518,108 тыс. тенге. Направлено исковое заявление в суд, иск ЮК областным судом удовлетворен.

В части размещения отходов взысканы в добровольном порядке суммы ущерба с АО «ПК «Южполиметалл» за сверхнормативное размещение золошлаков теплоэнергопредприятий на сумму 505,056 тыс. тенге, за самовольное размещения отходов производства (золошлак) и потребления (ТБО, металлолом) на сумму 141,600 тыс. тенге, которые оплачены в добровольном порядке.

На АО «3-Энергоорталык» выявлены следующие нарушения природоохранного законодательства:

– самовольного размещения отходов производства (золошлак) и потребления (ТБО, металлолом-металлическая стружка), нефтепродукты, то есть без разрешения на то специально уполномоченного органа, объем размещенных отходов составил 273,5 т.

По вышеуказанному факту предприятию предъявлена претензия о добровольном возмещении причиненного ущерба окружающей среде на сумму 456120 тенге, которая в 3 квартале оплачена в добровольном порядке.

На АО «Химфарм» выявлены следующие нарушения природоохранного законодательства:

– самовольного размещения отходов потребления (строительные отходы) то есть без разрешения на то специально уполномоченного органа, объем размещенных отходов составил 25 (двадцать пять) тонны.

По вышеуказанному факту специализированной природоохранной прокуратурой предприятию направлено представление о возмещении причиненного ущерба окружающей среде на сумму 31500 тенге, которая взыскана в бюджет государства.

В ходе проверки в сентябре т.г. установлено, что на территории горного отвода ТОО СП «Инкай» для разработки урановых руд, филиалом АО «Волковгеология» – ГРЭ-7 пробурены 20 (двадцать) скважин. При бурении используется раствор бентонитовой глины и воды, в результате чего образуется отработанный буровой шлам, который является остатком сырья и материалов образовавшийся при выполнении технологических работ, который утратил полностью или частично исходные потребительские свойства, необходимые для применения в соответствующем производстве. А в соответствии со ст. 1 Закона РК «Об охране окружающей среды» вышеуказанный буровой шлам является отходом производства. На момент проверки объем образованного бурового шлама самовольно без разрешения на то уполномоченного органа, размещенного в 20 зумпфах равен 704 т и в 3 котлованах равен 420 т.

Общий объем размещенного отходы бурового шлама – 1124 (одна тысяча сто двадцать четыре) тонн.

Таким образом, в результате производственной деятельности филиалом АО «Волковгеология» «Геологоразведочная экспедиция-7» и ТОО СП «Инкай» нанесен ущерб окружающей природной среде, заключающийся в самовольном размещении отходов отработанного бурового шлама, который составил 1 432 410 (один миллион четыреста тридцать две тысячи четыреста десять) тенге. Указанным предприятиям предъявлены требования о возмещении ущерба, причиненного самовольным размещением отходов. требования полностью удовлетворен и сумма ущерба внесена в бюджет государства.

3. Совершенствование экономического механизма государственного регулирования экологической безопасностью

3.1. Основные направления системы экономического стимулирования экологической безопасности

В условиях рынка прежние методы государственного регулирования макро- и микроэкономических процессов в экономической жизни республики показали свою неэффективность. Необходимо смещение акцентов стимулирования экономических, производительных сил в сторону предложения через совершенствование и разработку экономических методов воздействия, в совокупности составляющих экономический механизм.

Экономический механизм можно охарактеризовать как систему структурных элементов, взаимосвязанных между собой и взаимодополняющих друг друга, которые обеспечивая воздействие на интересы субъектов на микроуровне, увязывают их с интересами государства в целом (рис. 73) Реформа экономического механизма должна предусматривать совершенствование его составных элементов. Каждый экономический рычаг имеет ограниченную область воздействия на интересы субъектов регулирования. В исследуемой проблеме они играют специфическую роль. Поэтому важно совершенствование всей совокупности элементов экономического механизма.

Главной особенностью государственного регулирования в новых условиях в отличие от прежних является упор на косвенные методы воздействия на производственную деятельность хозяйствующих субъектов любой формы собственности посредством целенаправленной налоговой и финансово – кредитной политике [37].

Через экономические методы государственного регулирования необходимо создавать условия для стимулирования инновационной и инвестиционной активности, направленной на разработку и внедрение новых ресурсосберегающих, экологобезопасных технологических и технических решений, поскольку только через широкое и активное использование научно-технического прогресса можно добиться кардинальных решений повышения эффективности производства, снижения ресурсоемкости продукции, обеспечения экологической безопасности. Поэтому данное направление совершенствования экономического механизма, по нашему мнению, является определяющим в становлении экологобезопасного типа хозяйствования. Общество должно постоянно вести такую политику, которая была бы направлена, прежде всего, на восстановление проведение природоохранных мероприятий. Последнее, в свою очередь, делятся на две взаимосвязанные составляющие:

– минимизация ущерба, наносимого природной среде;

– максимизация локального эффекта предприятий.

Совместное положительное решение этих задач (с превалирующим значением первой) означает переход на внедрение ресурсосберегающей техники, экологически чистой, безотходной и мало отходной технологии, основанной на комплексном использовании сырья и отходов производства, систем обратного и бессточного водоснабжения. Оценку эффективности природоохранных мероприятий необходимо осуществлять с экономической и экологической точек зрения.

Рис. 73. Структура механизма экономического стимулирования

В условиях спада производства и ухудшения экологической обстановки, порожденной антропогенным воздействием на окружающую среду и ресурсорасточительным ее использованием, исключительно важное значение имеет решение вопросов, связанных с финансированием и своевременным проведением природоохранных мероприятий и в хозяйственной деятельности горного производства.

В связи с этим экономическим рычагом и инструментом должны стать целевые фонды охраны природы и рационального использования природных ресурсов различного уровня, а так же разумная мобилизация финансовых средств в целях реализации природоохранных мероприятий с наибольшей социально-экономической их эффективностью.

В настоящее время все платежи за нормативные и сверхнормативные выбросы (сбросы) загрязняющих веществ в окружающую природную среду, размещение отходов, за пользование природными ресурсами, штрафы за экологические правонарушения поступают в фонд охраны природы. Для формирования этого

фонда, кроме платежей, было бы целесообразно, привлекать и дополнительные средства, например, фонда экологического страхования, инвестиций (в том числе иностранных), а также возможности лизинговых компаний и коммерческих структур.

Следует отметить, что экологический кредит, который охватывает средства, выделяемые предприятию банком в обязательном порядке на строго фиксированный период времени для решения задач охраны окружающей среды, первоочередными получают те предприятия, которые наиболее интенсивно ее загрязняют. Сроки освоения кредита устанавливаются в зависимости от прогноза экологической ситуации, они не должны превышать время, в течение которого в окружающей среде могут наступить необратимые изменения, или устранение ущерба экологии станет экономически и технически невозможным. Предприятие должно считаться экологическим банкротом, если не в состоянии освоить эти средства в указанные сроки, и подлежит закрытию или перепрофилированию.

Экологическое кредитование имеет ряд преимуществ по сравнению со штрафными санкциями за загрязнением окружающей среды. Во-первых, штрафы, взимаемые с предприятия, уменьшают его экономические возможности для решения экологических проблем. Во-вторых, у части предприятий просто нет средств для проведения природоохранных мероприятий, в этом случае кредит просто необходим.

Таким образом, экологический кредит можно назвать прогрессивным налогом на предприятия, допускающие в силу несовершенства технологических процессов определенный уровень загрязнения окружающей

Все существующие и предложенные экономические рычаги в условиях расширения рыночного производства должны играть роль предупреждения отрицательных экологических последствий, а не стратегию их ликвидации. Естественно, сам по себе рынок не может решить природоохранных проблем и обеспечить соответствующую структурную перестройку производства. Однако предприятия, функционирующие в условиях рынка, становятся весьма чувствительными к мерам в области налогов, финансирования, кредита, цен и более управляемы с помощью экономических рычагов.

В настоящее время необходим не только поиск каких-то новых методических приемов, интегрирующих экологию в экономику, сколько преодоление сложившейся практики разделения затрат на «производственные» и «природоохранные», разделения критериев оценки эффективности затрат на экологические и социально-экономические. В создавшейся ситуации необходимо изменение модели социально-экономического развития республики. Ориентация научно-технического прогресса должна быть направлена на достижение положительного эколого-экономического эффекта. Сбалансированность экономического механизма с экологической стороной производственной деятельности предприятий – одно из важнейших условий экологизации производства, переориентации приоритетов в социально-экономическом развитии.

Меры по предотвращению или уменьшению негативного воздействия производства на окружающую природную среду необходимо предусмотреть уже при разработке или внедрении новых технологий, оборудования и материалов. С такой задачей в состоянии справиться только специализированная функциональная

служба промышленного предприятия, включенная в общую систему управления и тесно связанная с технологическими службами. Располагая необходимой оперативной информацией, она может осуществлять комплексные мероприятия по снижению влияния производства на окружающую среду. Чтобы усилить влияние природоохранной службы на производственный процесс, нами разработан стандарт предприятия «Управление охраной окружающей среды», в котором определены функциональная зависимость и взаимоотношения отдела с подразделениями АО «Соколовско Сарбайское горно- производственное объединение». В стандарте изложены основные требования, предъявляемые к производственным процессам, конструкторско-технологической документации, действующей на предприятии. Разработан порядок организации и проведения работ по охране окружающей среды в подразделениях АО «ССГПО». Стандарт предусматривает разделы по организации контроля за сбросами и выбросами загрязняющих веществ в окружающую среду, комплексные проверки подразделений, нормирование сбросов и выбросов в соответствии санитарно-гигиеническими требованиями.

Сформировано содержание оперативных функций управления охраной окружающей среды. Определены основные направления природоохранной деятельности служб главных специалистов (энергетика, технолога, металлурга, материально-технического снабжения). Введены единые бланки действующей в АО «ССГПО» системы контроля: акты проверок соблюдения природоохранного законодательства, справки, отчеты, журналы регистрации, учета и движения отходов и т.д.

Стандарт предприятия «Управление охраной окружающей среды» -основной документ при организации работ по охране окружающей среды и рациональному использованию природных ресурсов внутри АО «ССГПО».

Координацию природоохранной деятельности АО «ССГПО» осуществляет отдел окружающей среды (ООС). Юридический статус, структура, функциональные обязанности, права и задачи отдела ООС определены специальным положением, утвержденным генеральным директором и согласованным с главным инженером, специалисты отдела формируют конкретные экономические задания всем функциональным подразделениям, осуществляют контроль за их выполнением, оказывают помощь и определяют вклад каждого подразделения в конечный результат природоохранной деятельности.

В достижении конечного результата важную роль играет материальное стимулирование. Для поощрения работников отдела охраны окружающей среды в «Положение по материальному стимулированию» введен дополнительный раздел об условиях премирования за выполнение показателей по охране окружающей среды. Справки об их выполнении ежемесячно поступают в отдел труда и зарплаты АО «ССГПО». Размер суммы направляемой на премирование, определяется в зависимости от фактической экономии от снижения платежей за загрязнение окружающей среды относительно базовых расчетных показателей, принятых в начале года. Базовыми показателями являются расчетные суммы платежей за фактическое состояние окружающей среды, выполненные в соответствии с действующими нормативно-методическими материалами по расчетам платежей в установленном порядке:

– расчет базовых платежей за сброс загрязняющих веществ в водоем и городской коллектор производятся по среднестатическим данным анализа сточных вод, выполненного санитарно-промышленной лабораторией в течение предшествующего года;

– расчет базовых платежей за выбросы вредных веществ в атмосферу производится по данным годовой инвентаризации источников выбросов с учетом максимальных значений результатов анализов санитарно-промышленной лаборатории;

– расчет базовых платежей за размещение на утилизируемых промышленных отходов производится на основании сведений от цехов и подразделений по номенклатуре и объемам отходов, образующихся в течение года.

Основанием для материального стимулирования служит конкретный вклад подразделений или отдельных лиц в выполнение природоохранных мероприятий, обусловивших улучшение качества сточных вод, снижение выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников и автотранспорта, сокращение объемов неутилизируемых отходов производства, вывозимых на городскую свалку, экономию питьевой воды.

Исходными данными для определения размера премирования является реальная сумма экономии от снижения платежей за сбросы и выбросы в окружающую среду и размещения отходов производства, определяемая по формуле:

$$С_э \sim Сбаз \times Сфак,$$

где $С_{баз}$ – сумма базисных расчетных платежей за загрязнение окружающей среды в начале отчетного периода, тг; $С_{фак}$ – фактические выплаты по протоколам расчетов платежей, утвержденных экономическим фондам, тг; $С_э$ – реальная экономия для АО «ССГПО», тг.

Учет достигнутой экономии осуществляется через отдел охраны окружающей среды и подтверждается финансовым отделом и эпидемиологической службой. Основанием для начисления и выплаты премии служит справка отдела о выполненной работе с указанием платежей за период премирования производится по итогам работы за квартал. На эти цели выделяется 30 % сэкономленных за счет снижения платежей средств.

Распределение премии между работниками производится в зависимости от личного вклада каждого. При такой системе начисления премии ее сумма зависит от выполнения АО «ССГПО» заданной программы и объемов реализации продукции.

Вознаграждение за внедрение новой природоохранной техники получают не только служба охраны окружающей среды, которая является инициатором и организатором таких работ, но и непосредственные исполнители: работники вспомогательных служб, конструктора, технологи, как правило, нескольких подразделений.

Материальное стимулирование за внедрение новой техники положительно влияет на проведение научно-исследовательских работ. Для проведения НИОКР по вопросам экологии АО «ССГПО» выделяет значительные средства. Эти затраты окупаются: наличие альтернативных предположений по решению той или иной экологической проблемы позволяет выбрать эффективный вариант, а в связи с материальной заинтересованностью ускоряется процесс внедрения новой техники природоохранного назначения после завершения хоздоговора.

Таким образом, учитывая, что организационно-экономические методы регулирования охватывают и сферу экологии через стимулирование ресурсосберегающего экологически безопасного типа хозяйствования, в целом следует отметить, что управление природопользованием непосредственно связано со всей системой управления производством.

3.2. Совершенствование системы государственного контроля природоохранной деятельности

К специально уполномоченным органам государственного контроля в области охраны окружающей среды относится Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды РК, а также его территориальные подразделения.

Важным этапом на пути совершенствования механизма рационального природопользования являлось принятие Закона «Об охране окружающей среды» в РК [17] и Кодекса РК «О недрах и переработке минерального сырья» [15], где горно-металлургические комплексы полностью берут на себя задачи обеспечения эффективного использования и воспроизводства природных ресурсов, охраны окружающей среды от загрязнения и других вредных воздействий, организации производства на базе безотходных технологий как главного направления обеспечения сохранности природной среды.

Действуя на принципах полного хозрасчета и самофинансирования, горные предприятия осуществляют природоохранную деятельность за счет заработанных трудовыми коллективами собственных средств и кредитов банков. В отдельных случаях для решения крупных экологических проблем допускается финансирование за счет централизованных источников. Вместе с тем, при работе в новых условиях хозяйствования существует возможность обострения проблемы рационального природопользования, так как неизбежно возникает противоречие между стремлением предприятия к росту прибыли и необходимостью затрат на природоохранную деятельность. Такое противоречие является одним из конкретных проявлений не тождественности народнохозяйственных и хозрасчетных интересов, объективно существующих в экономике

Основным элементом экономического механизма рационального природопользования является стимулирование, построенное на экономическое ответственности предприятий за этот ущерб, который наносится ими в результате нерационального использования природных ресурсов и загрязнения природной среды. Конкретной формой выражения и количественной мерой такой ответственности являются различного рода платежи. Основные из них «плата за ресурс» и плата за загрязнение» или «плата за выброс, сброс загрязняющих веществ и размещение отходов в окружающей среде».

Применение принципа платности за пользование природными ресурсами не является чем-то новым для нашего народного хозяйства. На практике этот принцип реализуется уже давно через применение следующих видов платы за природные ресурсы: ставки возмещения затрат на геологоразведочные работы (ГРР); поденная плата (плата за лес на корню); тарифы на воду, забираемую промышленными предприятиями из водохозяйственных систем; тарифы за используемые в промышленности подземные воды; ставки возмещения затрат на рекультивацию

земель, нарушенных горными, строительными и другими работами; нормативы стоимости освоения новых земель.

На основе всех этих положений лежит принцип возмещения затрат на воспроизводство соответствующих природных ресурсов. Эти платежи ныне включаются в себестоимость продукции предприятий производителей и вносятся ими в бюджет по мере фактического расхода (использования) соответствующих ресурсов.

Анализ применения действующей системы платежей показывает, что они ещё не достаточно побуждают предприятия к экономии природных ресурсов и охране окружающей среды. К наиболее существенным недостаткам этой системы следует отнести следующие:

1. Остается ещё множество бесплатно используемых предприятиями природных ресурсов (не введены ставки на уголь, горючие сланцы, гидроэнергетические ресурсы и т.д.) или ставки установлены в пониженном размере (слюда и некоторые цветные металлы).

2. Не полностью реализуется возмещения затрат на воспроизводство соответствующих природных ресурсов. Например, при введении в 1982 г. новых ставок за использование минеральных ресурсов и увеличение количества полезных ископаемых, на которые они установлены с 25 до 60 % затрат государства на ГРР возмещаются в размере 80 %. Платежами, поступающими от промышленных предприятий, покрывается только около 40 % эксплуатационных расходов водохозяйственных систем. В целом по основным видам природных богатств возмещается лишь около 60 % затрат на их воспроизводство.

3. Существующие платежи, ориентированные только на затраты по воспроизводству природных ресурсов, занижены по сравнению с дифференциальной рентой, возникающей при эксплуатации ресурсов.

Отмеченные недостатки требуют разработки принципиально нового подхода к формированию платежей за природные ресурсы

Важнейшим направлением обеспечения приоритета общегосударственных интересов в рациональном природопользовании является совершенствование экономического механизма управления природоохранной деятельностью, полностью обеспечивающего эффективное использование и охрану природных богатств страны. С этой целью в новых условиях хозяйствования преобладающими методами управления становятся эколого-экономический механизм, с помощью которых конечные результаты работы предприятий тесно увязываются с эффективностью проводимой природоохранной деятельности [64].

Составляющей эколого-экономического механизма природопользования является плата за пользование ресурсами

Значение составляющей платы за пользование природными ресурсами эколого-экономического механизма природопользования определяется тем, что она должна играть роль в формировании стабильной экономической системы и устойчивого развития государства. А плата за пользование природными ресурсами в Республике Казахстан регулируется законодательными актами и нормативными документами Эколого-экономический механизм природопользования (дорисовать)

Устанавливаемые платежи предприятий за пользование природными ресурсами должны рассматриваться как экономические нормативы длительного

действия, характеризующие доход, получаемый предприятием, благодаря использованию им природного источника, находящегося в общенародной (государственной) собственности. Этот доход должен изыматься у предприятия и использоваться на общегосударственные нужды (в первую очередь на цели охраны и восстановления природных ресурсов) именно потому, что он получен не за счет усилий трудового коллектива, а путем использования предоставленного ему природного источника повышенной продуктивности. В соответствии с данным принципом, величины (ставки) платежей за природные ресурсы универсального назначения (земля как пространственный базис производства; вода, окружающая среда как место размещения отходов) определяются, исходя из нормативных затрат на замещение соответствующих ресурсов. Эти дифференцированные по районам и качественным характеристикам ресурсов нормативы затрат на освоение новых земель, увеличение водообеспечен-ности, нормативы затрат на уменьшение загрязнения окружающей среды.

Для природных ресурсов специализированного назначения (сельскохозяйственные угодья, запасы полезных ископаемых, запасы леса) величина платежей определяется нормативными затратами на улучшение и охрану сельскохозяйственных угодий (за счет госбюджетных ассигнований), нормативными затратами на геологоразведочные работы (по видам запасов полезных ископаемых), лесовоста-новление и охрану лесных ресурсов [63, 64].

Ставки платежей за использование природных ресурсов универсального назначения и воспроизводство природных ресурсов специализированного назначения, и воспроизводство природных ресурсов специализированного назначения определяются в следующем виде:

– отчисления в фонд геологоразведочных работ (по погашаемым запасам полезных ископаемых);

– платежи за воду, забираемую из водохозяйственных систем;

– попенная плата за вырубаемые запасы леса;

– платежи за земли, используемые промышленными предприятиями;

– отчисления на покрытие госбюджетных ассигнований на качественное улучшение земель и их охрану;

– ставки платежей за загрязнение окружающей среды (размещение производственных отходов в окружающей среде, выброс вредных веществ в атмосферу и сброс сточных вод в водоемы).

Все виды платежей за природные ресурсы устанавливаются в виде твердых ставок (нормативов) в расчете на единицу потребляемого (применяемого) ресурса – тонна погашенных запасов полезных ископаемых, кубометр воды, гектар земли в год. Ставки платежей дифференцируются с учетом природно обусловленных различий в эффективности применения соответствующих ресурсов [25, 26, 27].

Рассматриваемые платежи устанавливаются за использование природных ресурсов в пределах действующих природоохранных норм и лимитов. В случае нарушения указанных норм и лимитов (сверхнормативный расход или потери запасов полезных ископаемых, воды, нарушение правил землепользования и т.п.) применяются повышенные (штрафные) платежи, выплачиваемые из хозрасчетного дохода предприятий-нарушителей.

Штрафные платежи выплачиваются также предприятиями, не обеспечивающими выполнение установленных нормативов выбросов (сбросов) вредных веществ в атмосферу и водные источники. В качестве нормативов вредных выбросов используются: для атмосферного воздуха – предельно допустимые выбросы (ПДВ) или временно согласованные выбросы (ВСВ); для водных источников – предельно допустимый сброс (ПДС).

Факт превышения уровня загрязнения атмосферы и водных источников определяются органами Министерства экобиоресурсов РК на основании форм статистическое отчетности 2-ТП (воздух) и 2-ТП (водхоз) и утвержденных для предприятий уровней ПДВ и ПДС.

Экономическая заинтересованность предприятий в рациональном природопользовании зависит также и от развития хозрасчетных стимулов этой деятельности, которые обеспечиваются системой нормативов экономического стимулирования за достижение нормативных требований к природопользованию и их превышение.

Для экономического стимулирования ресурсосберегающих и природоохранных мероприятий используются собственные и централизованные источники средств.

Собственными источниками средств являются прибыль, получаемая за счет следующих мероприятий:

– экономия природных ресурсов по установленным платежам за погашенные запасы полезных ископаемых, за воду, вырубаемые запасы леса, за снижение выбросов вредных веществ и др.;

– реализация продукции из утилизируемых вредных для окружающей среды отходов производства;

– передача очищенных сточных вод для повторного использования сторонними потребителями;

– другие источники. В качестве централизованных источников могут использоваться:

– суммы, поступающие в республиканские и местные бюджеты в возмещение ущерба от нарушения природоохранного законодательства;

– средства, поступающие в госбюджет в форме платежей за лесопользование, возмещение затрат на геологоразведочные работы, в счет потерь сельского хозяйства от изъятия земель из сельскохозяйственного оборота и др.;

– отраслевые фонды развития науки и техники (для стимулирования научно-исследовательских и проектных работ природоохранного назначения).

При стимулировании за счет централизованных источников предприятия увеличивают свою балансовую прибыль на величину поощрительных выплат в соответствии со следующими результатами их природоохранной деятельности:

– снижение выбросов (сбросов) вредных веществ в окружающую природную среду по сравнению с установленными нормативами (ПДВ, ВСВ, ПДС);

– снижение забора воды из водных источников по сравнению с установленным лимитом (нормативом);

– снижение потерь запасов твердых полезных ископаемых при их добыче, по сравнению с нормативами;

– извлечение попутных полезных ископаемых, содержащихся во вскрышных и вмещающих горных породах;

– улучшение качества земель в результате проведения соответствующих природоохранных мероприятий, а также рекультивации нарушенных земель и земледелия малопродуктивных угодий.

Кроме того, поощрительные выплаты из централизованных источников средств могут быть установлены за проведение предприятиями, природоохранных мероприятий, обеспечивающих высокий народнохозяйственный эффект, но не дающих прибыли при действующих ценах за природопользование.

В перспективе система платежей за выбросы загрязняющих веществ должна быть тесно связана с прогрессивными стандартами на ПДВ загрязняющих веществ по отдельным технологиям и видам производств.

Для внедрения такой эффективной системы природопользования в практику необходимо:

1. Проведение экологической аттестации технологий и производств с указанием фактических и возможных выбросов загрязняющих веществ при условии достижения лучших мировых стандартов.

2. Разработка и внедрение мало- и безотходных технологий в производство с определением сроков и необходимых средств для достижения лучших стандартов.

Экономический ущерб от выбросов загрязняющих веществ в пределах стандарта должен включаться в себестоимость продукции. Эти меры будут стимулировать внедрение в практику экологически чистых технологий и малоотходных технологических схем.

Внедрение мало- и безотходной технологии позволяет вовлечь в эксплуатацию не месторождения, разработка которых считалась экономически нецелесообразной при извлечении только одного или двух основных компонентов. При этом в результате вовлечения в переработку первичных отходов и извлечения из них дополнительных полезных ископаемых увеличивается сырьевой баланс того или иного компонента.

Для широкого развития комплексного использования сырья в горнодобывающей промышленности в Республике Казахстан, а значит и для достижения минимальных величин отходов имеются все необходимые предпосылки. Так, несмотря на отраслевое деление по основным видам металлов на пять подотраслей (медную, алюминиевую, свинцово-цинковую, редкометаллическую и золотодобывающую) внутри них имеется тесная технологическая связь. Руда и концентраты одного предприятия служат сырьем для других, т.е. широко развита внутри отраслей производственная кооперация.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ показывает, что в Республике ведется большая работа по совершенствованию методических положений планирования природоохранной деятельности. Разработаны и применятся отраслевые методики расчета плановых показателей охраны и рационального использования природных ресурсов. Вместе с тем, проблема планирования природоохранной деятельности на горных предприятиях – требует дальнейшей разработки. В первую очередь,

это относится к эколого-экономическим аспектам методических положений природоохранного планирования. В этой главе рассмотрены методические положения экологического планирования [76, 34], в основу которых положены научные исследования, проведенные Казахским Национальным техническим университетом.

2. Эффективность природопользования в условиях рыночной экономики должна базироваться на отлаженном эколого-экономическом механизме, а эффективный механизм рационального использования ресурсов, ориентированный на формирование безотходных производств и экологически чистых технологий – охватывать первичные звенья производства, регионы и страны в целом.

3. Выявлено, что все природоохранные мероприятия делятся на три основные группы: инженерные, экологические, организационно-экономические. Исходя из основной цели – восстановления структуры и функционирования окружающей среды в зоне влияния горного предприятия, состав природоохранных мероприятий должен формироваться за счет мероприятий вышеуказанных трех групп. Комплексность решения природоохранных задач позволит обеспечить плановое снижение антропогенной нагрузки на природную среду и получить экономический эффект от улучшения состояния окружающей среды и рационального использования природных ресурсов.

4. В природоохранной сфере Республики происходят и финансово-экономические преобразования. В системе финансирования природоохранной деятельности все большее значение приобретают экологические Фонды. Создание Фондов охраны природы представляют возможность для дальнейшего совершенствования экономического механизма природопользования, и позволит существенно увеличить объем инвестиций, направляемых на природоохранные цели. Подготовкой приоритетных экологических проектов, планов, и программ, а также их подготовкой к финансированию и мониторингом выполнения занимается Национальный экологический центр устойчивого развития Республики.

5. Установлено, что сложное экономическое положение Казахстана в условиях перехода к рыночным отношениям, недостаток инвестиций, сдерживают выполнение глобальных преобразований в природоохранной деятельности и оптимизации её финансирования, создания системы мониторинга, вовлечения научных кругов и общественности в решение экологических задач, формирование системы экологического образования и воспитания. Поэтому в Казахстане, нуждающийся во внешней помощи со стороны международных организаций и других государств для решения приоритетных природоохранных мероприятий создан Консультативный экологический совет (КЭС).

6. В условиях рынка, использование и утилизация отходов производства и создание ресурсосберегающих (мало- и безотходных) производств обеспечивается с одной стороны, системой плановых показателей охраны, рационального использования недр и загрязнения окружающей среды, а также государственным контролем за природоохранной деятельностью предприятий, с другой стороны, экономическим стимулированием внедрения минералоресурсосберегающих технологий.

3.3. Направления формирования экономического механизма природопользования

Рассмотрим более подробно специальные механизмы и инструменты, непосредственно связанные с охраной окружающей среды и эксплуатацией природных ресурсов, т.е. собственно экономический механизм природопользования. Для большей эффективности экономические инструменты должны использоваться в тех областях экономики, где их применение потребует меньших затрат по сравнению с прямым регулированием для выполнения одинаковых природоохранных задач.

Можно выделить следующие элементы формирующегося экономического механизма природопользования в условиях перехода к рынку:

- платность природопользования;
- система экономического стимулирования природоохранной деятельности;
- плата за загрязнение окружающей природной среды;
- создание рынка природных ресурсов;
- совершенствование ценообразования с учетом экологического фактора, особенно на продукцию природоэксплуатирующих отраслей;
- экологические фонды;
- экологические программы;
- продажа прав на загрязнение;
- система «залог–возврат»;
- экологическое страхование.

На основе цены и экономических оценок природных ресурсов должна вводиться *платность природопользования.*

Введение платного природопользования должно способствовать более адекватному учету экологического фактора в экономике, рациональному использованию природных ресурсов. В определенной степени плата за природные ресурсы является аналогом экологического налога. Среди платежей за природные ресурсы можно выделить плату:

- за право пользования природными ресурсами;
- за воспроизводство и охрану природных ресурсов.

Плата за право пользования природными ресурсами практически предназначена для собственника данных природных ресурсов, будь то государство или частный владелец. Она связана с изъятием абсолютной ренты. Реальное распространение платы за природные ресурсы в России началось с 1992 г. после принятия законов РФ «О плате за землю», «О недрах». Платежи за воспроизводство и охрану природных ресурсов служат компенсацией затрат природных ресурсов в процессе производства.

Особое внимание в системе платного природопользования должно уделяться *штрафам, раз*личного рода санкциям за нерациональное использование природных ресурсов и загрязнение окружающей среды. В случае выбытия земель из-за их нерационального использования (несанкционированное складирование отходов, загрязнение тяжелыми металлами, радиоактивными элементами, почворазрушающая обработка), загрязнения воды и воздуха сверх допустимых нормативов должны применяться жесткие санкции, включающие экономическую и правовую ответственность. В частности, размер штрафов должен быть значителен, чтобы реально влиять на деятельность производителя.

Платное природопользование во многом определяет характер системы *экономического стимулирования* природоохранной деятельности, мероприятий по снижению загрязнения окружающей среды. Эта система должна способствовать формированию «экологосбалансированного» поведения производителя и потребителя, использованию в этих целях механизмов спроса и предложения. В систему экономического стимулирования можно включить следующие направления: налогообложение; субсидирование; льготное кредитование природоохранной деятельности; ускоренную амортизацию природоохранных фондов и другие мероприятия.

Большинство данных направлений уже показало свою экологическую эффективность во многих странах мира. Особенно широко используемым и эффективным инструментом считаются *налоги*. Экологические (их часто называют «зеленые») налоги призваны решить по крайней мере две задачи:

1) сделать стоимость продукции более адекватной по отношению к затратам, в том числе природных ресурсов, и ущербам, наносимым окружающей среде;

2) способствовать компенсации экологического ущерба самим загрязнителем, а не всем обществом (т.е. способствовать реализации принципа «загрязнитель платит» и интернализации, «замыканию» затрат). «Зеленые» налоги могут выполнять как стимулирующую роль – для развития экологосбалансированных производств и видов деятельности, так и «подавляющую» – для природоемкой деятельности.

Здесь государство дает только первоначальный толчок, с помощью налогов воздействуя на цены, а все остальное, по идее, должны делать рыночные механизмы: воздействовать на поведение производителя и потребителя, на спрос и предложение продукции в зависимости от степени ее экологичности и пр.

В общем случае для производителей налоговые льготы должны устанавливаться с учетом уровня проведения природоохранных мероприятий, экологичности вида деятельности. При осуществлении эффективной природоохранной деятельности целесообразно уменьшение налогооблагаемой прибыли, например, сокращение налогооблагаемой прибыли на сумму, которую предприятие реинвестировало на природоохранные цели.

В ряде случаев налоги вообще могут не взиматься. Например, от налогообложения освобождаются *экологические фонды*. Такую политику целесообразно проводить и для доходов предприятий, полученных от утилизации различного рода вторичных ресурсов и отходов, для добровольных взносов организаций и населения, а также российских и иностранных грантов на природоохранные цели и пр.

В экологоориентированной налоговой системе можно выделить четыре аспекта: отраслевой, технологический, региональный, продуктовый.

С позиций перехода экономики к устойчивому типу развития, ее экологизации и структурной перестройки система налогов должна предусматривать повышенные налоги на природоэксплуатирующие отрасли и секторы, находящиеся в начале природно-продуктовой вертикали, что снизит выгодность затрат в их развитие. Здесь налоги могут играть роль пресса, подавляющего природоемкую деятельность или переключающего эту деятельность на экологосбалансированную. В свою очередь, обрабатывающие, обслуживающие, инфраструктурные отрасли, находящиеся ближе к концу природно-продуктовой вертикали, должны облагаться пониженными налогами, стимулирующими их развитие. Такая система налогов

свойственна стимулирующему и жесткому типам экономического механизма природопользования.

Пониженные налоги должны применяться для ресурсосберегающих и малоотходных технологий. Техногенные и природоемкие производства и технологии должны облагаться повышенными налогами.

Существен и региональный аспект налогообложения. В регионах с напряженной экологической ситуацией система налогообложения должна быть «мягче» по сравнению с экологически благополучными районами для всех видов деятельности, связанных с реабилитацией территории или повышенными затратами из-за дополнительных экологических издержек.

Налоговые льготы должны предоставляться государственным и частным предприятиям и организациям, производящим природоохранное и экологичное оборудование, материалы, а также осуществляющим экологические услуги (строительство и реконструкция природоохранных объектов). Повышенные налоги должны применяться при обложении экологически опасной продукции: озоноразрушающих препаратов, этилированного бензина, пестицидов, энергоемкой техники. В Норвегии, например, за счет налогов на минеральные удобрения и пестициды финансируется программа развития устойчивого, экологосбалансированного сельского хозяйства.

Много внимания уделяется введению «зеленых» налогов в США. В 1989 г. в целях сокращения производства фреонов, разрушающих озоновый слой, здесь был введен налог на их продажу. Для того чтобы дать промышленности время на переход к производству заменяющей широко используемые фреоны продукции, этот налог был установлен прогрессивным во времени. Как показали исследования в США, введение даже ограниченного числа «зеленых» налогов позволило бы ежегодно получить дополнительно в федеральный бюджет 100 млрд долл.

Наиболее реально в ближайшее время широкое введение многими странами мира «углеродного» налога – налога на выбросы углерода в результате сжигания ископаемого топлива. Угроза глобального потепления, подписанные международные соглашения об обязательствах государств по снижению выбросов углерода делают введение этого налога необходимым. Он уже действует в Финляндии и Нидерландах. Даже по минимальным ставкам углеродного налога за выбросы в атмосферу в размере 10 долл. за 1 т в развитых странах будет возможно получение дополнительно 25 млрд долл. в год. В США есть предложения о ставке углеродного налога в 100 долл./т, тогда ежегодные поступления в бюджет составят 140 млрд долл. Налог должен быть значительно дифференцирован в зависимости от источника поступления углерода в атмосферу. Так, при налогообложении различных видов топливно-энергетических ресурсов наибольший налог должен налагаться на уголь, сжигание которого – один из основных источников выбросов углерода. В этих условиях налог на природный газ должен быть существенно меньше. В перспективе широкое введение углеродного налога в мире позволит сократить добычу первичных энергоресурсов, будет стимулировать более широкое использование альтернативных источников энергии, посадку лесов, связывающих углерод.

Говоря в целом о совершенствовании всей налоговой системы, можно выделить направление на значительное увеличение природно-ресурсной доли

налогов. Современные системы налогов в мире и в России сосредоточены прежде всего на взимании налогов с населения, с прибыли, добавленной стоимости. Плата за природопользование составляет в лучшем случае лишь несколько процентов от доходной части бюджета. Тем самым в определенной степени поощряется природо-эксплуатирующая деятельность. При сохранении общей суммы налогов целесообразно резкое изменение пропорций в пользу увеличения удельного веса налогов, связанных с природопользованием, прежде всего платы за право пользования природными ресурсами, «зеленых» налогов. По некоторым оценкам, эта доля должна возрасти на порядок и составить 30–50 % доходной части государственного бюджета. Это позволит адекватно учесть воздействие на окружающую среду, деградацию природных ресурсов и создаст стимул для снижения природоемкости экономики. В России это даст возможность также резко увеличить изъятие колоссальной ренты, которая принадлежит всему обществу и сейчас в значительной степени монополизируется природо-эксплуатирующими секторами, прежде всего ТЭК.

В значительном совершенствовании нуждается система *государственных субсидий* для экономики. Эти денежные пособия должны предоставляться прежде всего в целях стимулирования экологосбалансированной деятельности в народном хозяйстве. В настоящее время субсидии играют скорее противоположную, антиэкологическую роль. Особенно это проявляется в двух крупнейших экономических комплексах – ТЭК и АПК (аграрно-промышленном комплексе). До последнего времени государственные субсидии фактически способствовали разрушению природной среды, стимулируя разработку новых месторождений, использование энергоемких технологий в экономике и коммунальном хозяйстве, применение в сельском хозяйстве пестицидов, минеральных удобрений, тяжелой сельскохозяйственной техники, глобальных и нерациональных мероприятий по орошению и осушению земель.

Например, покупка продуктов химии для сельского хозяйства обходилась примерно в два раза дешевле по сравнению с действительными затратами на их производство. В условиях централизованной системы распределения, не учитывающей интересы потребителей, гораздо дешевле обходились сельскохозяйственным потребителям тракторы, комбайны, мелиоративное оборудование, которые было выгодно и удобно создавать производителям в сельскохозяйственном машиностроении. Мероприятия в области водных мелиорации практически полностью оплачивало государство, что лишало возможностей сельскохозяйственных производителей определять реальную потребность в орошении и осушении земель, контролировать затраты, влиять на качество работ. Дотации на энергоносители для промышленности и коммунального хозяйства привели к колоссальной энергоемкости экономики.

К сожалению, подобная антиэкологическая политика субсидий в значительной степени продолжается. Субсидируются природоемкие проекты в энергетике, развитие атомной энергетики, даются субсидии производителям неэффективной сельскохозяйственной техники.

Ускоренная амортизация основных, фондов является хорошо апробированной в мире мерой для стимулирования приоритетных видов деятельности, научно-технического прогресса. Предприятие, завышая амортизационные отчисления,

тем самым сокращает размер прибыли, подлежащей налогообложению, в результате чего возрастает его чистая прибыль.

Важным элементом в системе экономического механизма природопользования являются *платежи за загрязнение природной среды*. Они призваны компенсировать эколого-экономический ущерб, экстерналии, наносимые предприятиями и организациями в ходе деятельности. Хотя очевидно, что сейчас они компенсируют лишь незначительную часть ущерба. Платежи за загрязнение являются средством наказания предприятий-загрязнителей и средством реализации принципа «загрязнитель платит».

Россия – одна из первых стран в мире, где введены платежи за загрязнение (январь 1991 г.). Введено *три вида платы:*

1) за выброс в атмосферу загрязняющих веществ;

2) за сброс в водные объекты или на рельеф местности загрязняющих веществ;

3) за размещение отходов.

В зависимости от степени воздействия на окружающую среду устанавливаются *два вида нормативов платы:*

1) за предельно допустимые выбросы (сбросы, размещение отходов) загрязняющих веществ в природную среду (в рамках установленных нормативов);

2) за превышение показателей предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ.

В последнем случае платежи возрастают в несколько раз. Существенным моментом является и механизм образования источников платежей. Платежи в пределах нормативов загрязнения могут включаться в себестоимость и тем самым оплачиваются потребителем. Сверхнормативные платежи образуются за счет прибыли предприятий, что снижает их рентабельность.

Такая система платежей в случае установления достаточно высоких нормативов стимулирует производителя загрязнений к их минимизации. Современные нормативы довольно низкие, однако само их существование играет важную роль для рождения новой ситуации, в условиях которой необходимы адаптация экономики к экологическим ограничениям, изменение поведения производителей. Другой стимулирующий момент – возможность учета в сумме платежей и тем самым их уменьшения за счет затрат, сделанных предприятием на природоохранные работы (строительство различного рода очистных сооружений, фильтров, землеохранные мероприятия).

Создание рынка природных ресурсов целесообразно в условиях их дефицитности и возможности получения значительных средств от их продажи. Это особенно актуально в условиях огромного природного богатства России и дефицита средств для его рационального использования и охраны. Цивилизованный рынок ресурсов может позволить активно вовлечь иностранный капитал в природоэксплуатирующие отрасли. Создание бирж природных ресурсов, проведение аукционов, где на конкурсной основе российские и иностранные предприниматели могли бы покупать природные ресурсы, право на их разработку или аренду при жестком экологическом контроле и комплексной экологической экспертизе позволили бы существенно увеличить государственные и региональные доходы от природопользования.

Рынок природных ресурсов (прежде всего земли) должен предусматривать и создание ипотечной системы, что позволит владельцам ресурсов закладывать их для получения инвестиций в развитие производства.

Проблема совершенствования ценообразования в экономике и прежде всего в природоэксплуатирующих отраслях имеет важное значение для совершенствования природопользования. Можно выделить два аспекта этой проблемы.

Во-первых, многие проблемы использования достижений научно-технического прогресса, внедрения малоотходных технологий наталкиваются на неэффективность ресурсосбережения при низких ценах на природные ресурсы. Оказывается гораздо более выгодным проводить ресурсорасточительную политику и компенсировать отсталость технологий перепотреблением ресурсов. В этих условиях разумное повышение цен на природные ресурсы, более полный учет экологического фактора в цене на продукцию природоэксплуатирующих отраслей стимулировали бы переход производителей в народном хозяйстве на режим ресурсосбережения.

Во-вторых, цена должна более полно учитывать уровень экологической безопасности продукции. Продукция, чистая в экологическом отношении, должна иметь более низкую цену и быть более предпочтительной для потребителя по сравнению с продукцией, производство которой связано с негативным влиянием на окружающую среду или которая сама по себе представляет опасность для здоровья человека и природы в процессе потребления или в виде отходов. Необходимо использовать механизм налогов на экологически опасную продукцию, наценок, субсидий и льгот для производителей и потребителей чистой продукции. Например, в сельском хозяйстве для производителей должно быть выгоднее использовать биологические средства защиты растений по сравнению с пестицидами, органические удобрения по сравнению с минеральными.

Важное значение для финансирования охраны природы играют внебюджетные *экологические фонды.* Главная цель формирования таких фондов – создание независимого от государственного бюджета централизованного источника финансирования природоохранных нужд. Эти фонды создавались как поддерживающая финансовая структура, дополняющая государственные затраты на экологические цели. Однако в России в связи с дефицитом средств в экономике в переходный период, нехваткой государственных инвестиций и средств у предприятий в природопользование экофонды стали основным источником финансирования.

Среди *основных задач экологических фондов* можно выделить:

- финансирование и кредитование программ и научно-технических проектов, направленных на улучшение качества окружающей среды и обеспечение экологической безопасности населения;
- мобилизацию финансовых ресурсов на природоохранные мероприятия и программы;
- экономическое стимулирование рационального природопользования, внедрение экологически чистых технологий;
- содействие в развитии экологического воспитания и образования.

Источники формирования экофондов – в основном платежи предприятий за выбросы, сбросы загрязняющих веществ и размещение отходов; штрафные

платежи за аварийное загрязнение; средства за возмещение экологического ущерба при нарушении природоохранного законодательства предприятиями; добровольные взносы. Как показывает практика, самый большой вклад в фонды вносят платежи за загрязнение окружающей среды: их доля составляет 80–85 %.

Для реализации важнейших экологических целей, стоящих перед обществом, большое значение имеет формирование *экологических программ. В* зависимости от цели их реализация возможна на международном уровне, внутри отдельной страны, на региональном уровне. Программа представляет собой увязанный по ресурсам, исполнителям и срокам комплекс мероприятий, направленный на эффективное решение экологических проблем. Можно вспомнить грандиозные по затратам экологические программы в США по возрождению Великих озер, японские экологические программы и т.д.

В реализации программ значительную роль играет государство, так как необходимость быстрой концентрации значительных ресурсов, сложность проблемы и неопределенность экономической эффективности делают целесообразным использование прямого регулирования при поддерживающей роли рыночных инструментов. В России федеральные целевые экологические программы необходимы для решения следующих проблем:

- выполнения международных обязательств (охрана озонового слоя, парниковые газы, сохранение биоразнообразия);
- охрана и рациональное использование конкретного вида природного ресурса;
- охрана особо ценных природных объектов (озеро Байкал, речные системы, бассейны морей);
- реабилитация зон экологического бедствия (Чернобыльская зона);
- целевые экологические научно-технические программы.

Большие перспективы имеет развитие рыночных механизмов *продажи прав на загрязнение*. Этот рынок сейчас активно формируется в США. Одним из важнейших принципов такого рынка является право на продажу квоты на различного рода выбросы и сбросы. Упрощенная схема такой торговли следующая. В рамках ограниченной территории вводится лимит на определенную сумму выбросов (сбросов) загрязняющих веществ. Данная сумма загрязнений не может быть превышена при новом строительстве. Эта система регулирования загрязнения получила красноречивое название «принцип пузыря».

В этих условиях вновь строящееся или реконструируемое предприятие, желающее расширить свое производство, попадает в рамки жестких экологических ограничений на возможности собственного увеличения загрязнения окружающей среды в регионе. Поэтому перед предприятием стоит выбор: создать надежную систему очистки у себя или купить право на дополнительное загрязнение у другого предприятия. Решающее влияние на выбор оказывает величина удельных затрат на очистку на самом предприятии и других производствах в регионе. Если затраты на удержание собственных загрязнений в рамках лимита более значительны, чем подобного рода затраты у соседнего предприятия, то оказывается выгодным заплатить соседу, чтобы тот усовершенствовал свои очистные системы и снизил свой объем загрязнения. В результате общая сумма загрязнений не увеличивается, а сумма расходов на охрану окружающей среды минимизируется.

Создание механизма продажи прав на загрязнение возможно и на глобальном уровне. Например, введение «углеродного» налога создает массу проблем для промышленности развитых стран, которая уже практически исчерпала «дешевые» способы уменьшения выбросов. В этом отношении показательно предложение немецких парламентариев о возможности России взять на себя часть обязательств Германии по связыванию углерода. Это достигается путем посадки леса на территории России за счет немецкой стороны. Стоимость всей программы 100 млрд марок. Ключевым моментом здесь является то, что лесоразведение в России обойдется Германии в 10 раз дешевле по сравнению с попытками решить проблему снижения выбросов углерода за счет технических мер на территории самой Германии. На первый взгляд такой довольно экзотический проект имеет под собой твердую экономическую основу и оценку экономической эффективности. По расчетам, для поглощения 1 млрд т «немецкого» углекислого газа (диоксида углерода CO_2) необходимы посадки леса на площади 1 млн кв.км, что составляет 6 % площади России.

В случае введения жестких ставок налогов на загрязнение можно ожидать широкого использования в мире таких покупок прав на загрязнение между различными странами, что будет благоприятствовать охране окружающей среды на глобальном уровне, борьбе с бедностью, так как такой механизм позволит осуществлять дополнительный приток финансовых ресурсов из развитых стран в развивающиеся, где борьба с загрязнениями менее капиталоемка.

Пожалуй, самым старым и проверенным экономическим инструментом в охране окружающей среды является залоговая система, или *система «залог–возврат»*. Это хорошо знакомая всем система, когда, покупая какой-нибудь товар, мы оплачиваем также дополнительную стоимость, которая затем возвращается нам обратно: возврат пустых бутылок, все более широко применяемый в различных странах возврат израсходованных электрических батареек, различного рода пластиковых контейнеров и пр. Несмотря на простоту, данный механизм позволяет снизить поступление отходов в окружающую среду, в том числе и токсичных, сберечь значительные средства и ресурсы за счет утилизации.

С каждым годом все острее становится проблема ликвидации загрязнений окружающей среды в результате аварий и катастроф. Об их колоссальном эколого-экономическом ущербе свидетельствуют, например, данные по многочисленным авариям на нефтепроводах. Возможным экономическим механизмом предотвращения или смягчения последствий аварий является *экологическое страхование* – страхование ответственности предприятий – источников повышенного риска за причинение убытков в связи с аварией, технологическим сбоем или стихийным бедствием, приводящим к загрязнению окружающей среды.

Создаваемые страховые компании позволяют решить ряд экономических задач: компенсировать убытки, образующиеся у застрахованного предприятия и третьих лиц в результате загрязнения окружающей среды; экономически стимулировать предотвращение аварий за счет увеличения противоаварийных затрат со стороны страховой компании при уменьшении затрат самого страхователя; повысить эффективность использования денежных средств, концентрируемых в страховых фондах, и т.д.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Конституция Республики Казахстан. Алматы: Казахстан, 1995.

2. Израэль Ю.А. Проблемы охраны природной среды и пути их решения. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 218 с.

3. Хачатуров Т.С., Лойтер М.Н. Охрана окружающей среды и ее социально-экономическая эффективность. М.: Наука, 1980. – 252 с.

4. Хачатуров Т.С. Экономические проблемы рационального природопользования и охраны окружающей среды. М.: МГУ, 1982. – 208 с.

5. Папенов К.В. Резервы интенсификации общественного производства. М.: Изд. Моск. ун-та. 1992.

6. Голуб А.А., Струкова Е.Б. Экономические методы управления природопользованием. М.: Наука, 1993. – 217 с.

7. Голуб А.А., Струкова Е.Б. К вопросу об экономической оценке ассимиляционного потенциала природной среды. Экономика и мат. методы. 1988. Т. XXIV. Вып. 3.

8. Голуб А.А., Струкова Е.Б. Проблемы экономизации взаимоотношений природы и общества. Известия АН СССР, Сер. экономическая. 1989, № 6.

9. Голуб А.А., Струкова Е.Б. Экономика природопользования. Аспект Пресс». М., 1995.

10. Гофман К.Г. Экономическая оценка природных ресурсов в условиях социалистической экономики. М.: Наука, 1977. – 317 с.

11. Гофман К.Г., Вишт М.Б. Платежи за природопользование // Экономика и организация промышленного производства. 1990.

12. Добровольская А.М. Раппопорт В.С. Организационные проблемы управления охраной окружающей среды // Природные ресурсы и окружающая среда. – 1984. – Вып. 39, № 12. – С. 32–41.

13. Economics and Resource Policy. Ed / by J.A Butlin London: Longman House., 1988.

14. Минц А.А. Естественные ресурсы. Содержание понятия и некоторые вопросы классификации // Природа и общество. – М.: Наука, 1970. – С. 165–181.

15. Герасимович В.Н,, Голуб А.А. Методология экономической оценки природных ресурсов. М.: Наука. 1988.

16. Раяцкас Р.Л., Суткайтис В.Р. Социально-экономическая эффективность производства. – М.: Наука, 1984. – 188 с.

17. Хачатуров Т.С. Экономика природопользования. – М.: Экономика, 1982. – 256 с.

18. Барта Б. Рациональное использование природных ресурсов и охрана окружающей среды. М.: 1978. – с. 26–30. 35–41.

19. Велихов Е., Старикович М., Платит тот, кто загрязняет. Экономическая газета, 1989, № 33. – с. 13.

20. Степин В.В. Экономические основы природопользования. – М.: Лесная промышленность, 1982. – 152 с.

21. Рац В.М. Строить чтобы жить // Человек и природа. – 1988. – № 4.- С. 3 -27.

22. Балацкий О.Ф., Мельник Л.Г., Яковлев А.Ф. Экономика и качество окружающей среды. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 190 с.

23. Балацкий О.Ф. Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов. М.: 1990. – 205 с.

24. Балацкий О.Ф. и др. Экономика и организация охраняемых природных территорий. М.: 1989. -172 с.

25. Тупыця Ю.Ю. Эколого-экономическая эффективность природопользования. М.: Наука, 1980. – 96 с.

26. Экономика природопользования. Под ред. Н.В.Пахомовой и Г.В. Шалабина. СПб.: Изд. С.-Петербург-ского университета. 1993. – 328 с.

27. Гумарова Т.А. Эколого-экономические аспекты долгосрочного развития // Стратегия развития РКдо 2030. КазНГУ, 1997.

28. Информационный экологический бюллетень Республики Казахстан. 2 квартал 1997 года. – Алматы: 1997.

29. Научные основы рационального использования ресурсовых видов животных Казахстана: Отчет о НИР (заключ.) / Ин-т зоол. и генофонда животных (ИЗГЖ). – 40 с.

30. Теоретические основы непрерывных экологических образований: Отчет о НИР (промеж.) / Алматинский гос. ун-т им. Абая (АГУ). – 30 с. 85.Математическое моделирование объектов природной среды и процессов принятия эколого-экономических решений: Отчет о НИР (заключ.) / ин-т теор. и прикладн. математ. (ИТПМ). – 287 с.

31. Оценка современного экологического состояния и разработки рекомендаций по обустройству водоохранных зон реки Весновка: Отчет о НИР (заключ.) / НИИ пробл. экол. при КазГУ (НИИПЭ). – 113 с.

32. Экономика природопользования. Под. Ред. Н.В. Пахомовой и Г.В. Шалабина. Изд. С-Петербургского университета, СПБ: 1993 с. 53.

33. Оценка современного экологического состояния и разработка рекомендаций по обустройству водоохранной зоны реки Большая Алматинка: Отчет о НИР (заключ.) / НИИ пробл. экол. при КазГУ (НИИПЭ). – 165 с.

34. Гальперин М.В. Динамика эколого-экономических систем в линейном приближении. Гидрометеоиздат, М.: 1984. с. 45.

35. Глухов В.В., Лисочкина Т.В., Некрасова Т.П. Экономические основы экологии. Учебник. Специальная литература, СПБ: 1995. с. 92.

36. Злотникова Т. Экологическая безопасность (соотношение экологии, экономики, права). Экономист, М.: 1996. с. 27.

37. Кодекс о недрах и переработке минерального сырья РК. – Алматы. – 367 с.

38. Порядок определения размера ущерба, причиненного природной среде, нарушением природоохран-ного законодательства. – Алматы: Минэкобиоресурсов,1985г.

39. Сборник нормативных актов Госкомприроды РК. – Алматы. Казахстан, 1993.

40. Сборник руководящих материалов по охране недр. – М.: Недра, 1983. – 187 с.

41. Методические рекомендации по комплексной оценке эффективности мероприятий, направленных на ускорение научно-технического прогресса. М.: ГКНТ СССР, 1988. – 45 с.

42. Нурпеисова М.Б., Бекбасаров Ш.Ш. Проблемы экологии горного производства – Алматы: – Тр. Межд.конфер. «КазНТУ – образованию, науке и производству РК» – Алматы: 1999.

43. Уманец В.Н., Бекбасаров Ш.Ш. Эффективность природопользования – Алматы: Труды межд.конф. «Горное дело в Казахстане. Состояние и перспективы», 2000.

44. 33.06 экологической экспертизе. Закон Республики Казахстан от 18.03.97. // Экономика и предпринимательство. – № 9. – Апрель 1997.

45. 34.06 охране окружающей среды. Закон Республики Казахстан от 15.07.97 // Экономика и предпринимательство. – № 23. – июль 1997.

46. Кажмуратов К.К., Сагимбаев Е.Ф., Тайкенова А.К. Экологические проблемы и основные пути их решения в Казахстане // Вестник АН КазССР. – Алма – Ата, 1990. – с. 39–47.

Приложение Б

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ

x, y, z – декартовые координаты;
t – время;
U_φ, V_φ – крупномасштабные составляющие скорости;
$\vec{u}$ – вектор скорости;
f – параметр Кориолиса;
V – кинематическая вязкость;
ρ_a – плотность атмосферы;
$\rho_в$ – плотность воды;
Q_T – приток (отток) массы;
R – газовая постоянная;
R_* – универсальная газовая постоянная;
T – температура в Цельсиях;
m_d – масса газа для сухого воздуха;
m_w – масса газа для водяного пара;
q – влажность атмосферы;
C_p – теплоемкость при постоянном давлении;
γ_a – сухоадиабатический градиент температуры;
ϑ – потенциальная температура;
θ_0 – средняя температура;
L_w – скрытая теплота конденсации (или сублимации);
R_n – лучистая энергия Солнца;
φ – скорость образования жидкой фазы;
$K_м$, $K_н$ – коэффициенты турбулентного обмена для импульса и тепла;
$S = \gamma_a - \gamma$ – стратификация атмосферы;
P – давление;
Π – аналог давления (функция Exснера);
χ – постоянная Кармана;
L – масштаб длины Монина-Обухова;
u_* – динамическая скорость;
ϑ_* – масштаб температуры;
S – концентрация примеси;
l – путь смещения турбулентности;
z_T – условная высота пограничного слоя;
z_0 – параметр шероховатости;
$z_g(x, y)$ – функция, описывающая рельеф местности;
z^* – вертикальная координата в криволинейной системе;
H_x, H_y, H_z – потоки тепла;
G_x, G_y, G_z – потоки влаги;
$\varphi_i(t, r, \vec{x})$ – функция распределения капли водности;
$F\uparrow$ – восходящий поток тепла;

$F\downarrow$ – нисходящий поток тепла;
q_{l1} – удельная водность;
T_s – температура почвенной среды;
Δx, Δy, Δz – шаги по пространственным координатам;
Δt – шаг по времени;
f_0 – относительная влажность;
γ_0 – стандартный градиент температуры;
D – замкнутая трехмерная область;
∂D – общая граница области;
$\partial D_в$ – верхняя граница;
$\partial D_н$ – нижняя граница;
$\partial D_б$ – боковая граница;
Q – мощность источника;
$\vec{u}'$ – отклонения вектора скорости от фонового;
θ' – отклонения потенциальной температуры от фонового;
H_s – высота источника;
grad – оператор градиента;
div – оператор дивергенции;
$\delta(\cdot)$ – дельта функция Дирака;
inf – точная нижняя граница;
sup – точная верхняя граница;
∇ – оператор «набла»;
Δ – оператор Лапласа;
max – максимум;
min – минимум;
$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y} + w\frac{\partial}{\partial z}$ – полная производная;
$\sum$ – знак суммирования;
°C – температура по Цельсию;
K – температура в Кельвинах;
ФНД – факел высокого давления;
ФВД – факел низкого давления;
ПСА – пограничный слой атмосферы;
КС – компрессорная станция;
АСУ – автоматизированная система управления;
СЗЗ – санитарно-защитная зона;
СНиП – Строительные Нормы и Правила;
ВСП – высота слоя перемешивания;
ПЗА – потенциал загрязнения атмосферы;
ПНЗ – пост наблюдения загрязнения;
ПДВ – предельно-допустимые выбросы;
КПД – коэффициент полезного действия;
ПЗ – первичные заболевания;
ИЗА – индекс загрязнения атмосферы.

ООС – охрана окружающей среды;
ОПС – оперативно- прогностическая система;
ОА – объективный анализ.
КПС – конвективный пограничный слой;
ПДК – предельно-допустимая концентрация, мг/м L_w;
$ПДК_{р.з}$ – предельно-допустимая концентрация вредного вещества в воздухе рабочей зоны, мг/м^3;
$ПДК_{с.с}$ – предельно-допустимая концентрация вредного вещества в населенном пункте, мг/м^3;
$ПДК_{в}$ – предельно-допустимая концентрация вредного вещества в сточных водах, мг/м^3.
$ПДК_{м.р}$ – максимальная разовая концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест, мг/м^3;
ЛК50 – летальная концентрация вредного вещества, вызывающая при вдыхании гибель 50 % подопытных животных, мг/л;
СДЯВ – сильно действующее ядовитое вещество;
РВД – радиационные вертикальные движения;
ВД – вертикальные движения;
КазНИГМИ – Казахский научно-исследовательский гидрометеорологический институт;
ТМ – тяжелые металлы;
НПЗ – нефтеперерабатывающий завод;
ТШО –
ВВ – вредные вещества;
ПАУ – полициклические ароматические углеводороды;
ЗАЗ – зона активного загрязнения;
БП – бенз(а)пирен;
ТН – тяжелые нефти;
НБП – нефтебитумонознопороды;
ЕЭС – Европейский экономический союз;
США – Соединенные Штаты Америки;
МЭ – микроэлемент;
ННК – национальная нефтяная компания;
СП – совместное предприятие;
АО – акционерное общество;
ТОО – товарищесто с ограниченной ответственностью;
СНГ – союз независимых государств;
ПХГ – подземное хранилище газа;
ШФЛУ – широкие фракции легких углеводородов;
Га – гектар;
T – температура;
С – сероводород;
Н – углеводород;
NO_2 – двуокись азота;
SO_2 – двуокись серы;

CO – окись углерода;
$Al_2(SO_4)_3NH_2O$ – кристаллогидрат;
Mn – марганец;
Cr – хром;
H_2S – сероводород;
NO – окись азота;
C_nH_m – углеводы;
C_1–C_{10} – углеводороды;
CH_3SH – метилмеркаптан;
$\overline{V}_{ПЕР}$ – средняя скорость ветра в слое перемешивания;
V_3 – средняя скорость ветра у поверхности земли;
v_1, v_2, v_3 – компоненты вектора скорости по осям криволинейной системы координат q_1, q_2, q_3;
$V = V(v_1, v_2, v_3)$ – вектор скорости;
V_δ – скорость опускания жидкой влаги;
V_c – скорость опускания твердых примесей;
u_* – скорость трения;
w, ΔT – скорость и перегрев газоаэрозольного выброса;
$U_Ф$, T – скорость ветра и температура окружающего воздуха;
w – скорость гравитационного оседания примеси;
ω – угловая скорость вращения Земли;
u, v, w – компоненты скорости ветра, переменные в пространстве и времени;
u – вектор скорости с компонентами u, v, w в направлении пространственных координат x;
$t \in [0, T]$; $\tilde{u} = (u_1, u_2, u_3)$ – вектор скорости ветра с составляющими вдоль осей координат x_1, x_2, x_3 θ соответственно;
v_g – скорость гравитационного оседания;
$\vec{\omega}$ – вектор угловой скорости вращения Земли;
$I_Ф$, I_m – отнесенная к единице массы скорость прироста соответствующей фазы (влажного воздуха и мелких капель) за счет микрофизических процессов;
R_i – скорость производства i-й примеси за счет химических реакций;
P_i^l – скорость производства i-й примеси для реакции l;
Ф – скорость образования жидкой фазы;
m – скорость конденсации (испарения) влаги;
$v(z)$ и $K(z)$ – вертикальные проекции скорости ветра и коэффициента турбулентности в пограничном слое;
$z_Ф$ – высота измерения скорости ветра (высота флюгера);
$K_{МУЗ}$ – метеорологические условия загрязнения;
K_Z – тип синоптической ситуации;
K_M – параметр, определяемый толщиной слоя перемешивания (H_{TD});
$K_{\overline{V}}$ – параметр, зависящий от средней скорости ветра в слое $(\overline{V}_{ПЕР})$;

$K_{h.g}$ – доля составляющей ущерба здравоохранения, связанная со снижением национального дохода на одного рабочего;

$K_{\text{о.б}}$ – доля составляющей ущерба, связанная с оплатой бюллетеней;

K_m – доля составляющей ущерба;

K, K_h – коэффициенты турбулентного обмена в вертикальном и горизонтальном направлениях;

K_M, K_H – параметры кинематической вязкости и диффузии;

$K_s(x, y, z)$, K_s – коэффициент температуропроводности почвы;

K_x, K_y, K_z – компоненты силы Кориолиса $K = -2[\vec{\omega}, \vec{V}]$, (где ω – угловая скорость вращения Земли);

K_η – гидравлическая проводимость;

K_M – коэффициент молекулярной температуропроводности;

K – степень роста крупных или убывания мелких капель в единицу времени;

K_S, K_z – коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии;

K_0, v_0 – фоновые значения вихревой диффузии и вязкости, равные соответственно 0,3 и 0,63;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты турбулентной диффузии вдоль соответствующих осей координат;

k_1 – коэффициент вертикального обмена на высоте $|L|$;

k – параметр Кармана 45;

z_u, z_θ – параметры шероховатости для ветра и температуры (индексами 0 и h обозначены метеорологические поля при $z = 0$ и $z = h$ соответственно);

l_0 – параметр Кориолиса при $\theta = 45°$;

l – параметр Кориолиса;

z_u, z_θ – параметры шероховатости для ветра и температуры (индексами 0 и h обозначены метеорологические поля при $z = 0$ и $z = h$ соответственно);

$R(Dt)$ – область допустимых значений параметров;

R_n – газовая постоянная для водяного пара;

R – универсальная газовая постоянная;

χ – постоянная Кармана;

σ – постоянная Стефана-Больцмана;

R – удельная газовая постоянная сухого воздуха;

χ – постоянная Кармана, равная 0,4;

a_s, b – эмпирические константы, равные соответственно 0,3 и 1,0;

b – эмпирический константа, определяющий поглощение примеси подстилающей поверхности;

$I_{h.g}$ – индекс изменения производства национального дохода на одного работающего;

$I_{\text{о.б}}$ – индекс изменения оплаты бюллетеней в течение одного дня на одного работающего;

I_m – индекс изменения затрат на медицинское обслуживание на душу населения;

I_k – индекс изменения нормативных экономических показателей ущерба жилищно-коммунального хозяйства в i-м году по отношению к базовому году;

A – коэффициент, зависящий от стратификации атмосферы;

A – термический эквивалент работы;
h – коэффициент рельефа местности;
α_l – суммарный коэффициент поглощения длинноволновой радиации;
c_u, c_θ – коэффициенты трения и теплопередачи соответственно;
H_1, H_2, H_3 – коэффициенты Ламэ;
d_i^j – коэффициент поглощения i-й примеси для реакции j;
H_0 c_u, c_θ – коэффициенты трения и теплопередачи соответственно;
f_s – коэффициент серости почвы;
η – коэффициент молекулярной вязкости воздуха;
D_x, D_y, D_z – коэффициенты турбулентной диффузии по осям x, y, z;
λ – коэффициент теплопроводности почвы;
$\lambda_В$, $\lambda_П$ – коэффициенты термовлагопроводности;
$D_В$, $D_П$ – коэффициенты диффузии;
$D_В^T$, $D_П^T$ – коэффициенты влаготермопроводности;
α – коэффициент интенсивности поглощения или выброса;
μ, ν – коэффициенты турбулентности в горизонтальном и вертикальном направлениях; индексом отмечены операторы, действующие в горизонтальном направлении;
β – коэффициент захвата примеси на подстилающей поверхности ($0 \le \beta < \infty$);
z_0 – коэффициент шероховатости;
Au – коэффициент, зависящий от класса устойчивости атмосферы;
λ – коэффициент сопротивления струи, а индексы s, r обозначают компоненты векторов относительно координатных ортов вдоль s и r соответственно;
β_1, z_1 – прогоночные коэффициенты;
p – давление;
q – удельная влажность;
ρ – плотность;
ρ_c, ρ_k – плотности примеси, капли;
ρ^* – плотность почвы;
$\rho_В$ – плотность воды;
θ_0, q_0 – температура и влажность подстилающей поверхности;
T_V – виртуальная температура;
γ_a, γ – адиабатический и обычный вертикальные градиенты температуры;
T_0 – средняя температура в атмосфере;
θ – потенциальная температура;
ΔT_0 – перегрев примеси относительно температуры $\vec{\omega}$ окружающей среды;
H_0 θ_0, q_0 – температура и влажность подстилающей поверхности;
$f_0(f)$ – температура поверхности воды;
T – абсолютная температура почвы;
T' – отклонения температуры почвы от среднесуточного значения;
θ_*, q_* – масштабы потенциальной температуры и удельной влажности;
θ – потенциальная температура;
$\overline{T_B}$ – средняя по площади виртуальная температура;

γ_{BA} – влажно-адиабатический градиент температуры;
T_{w0} – температура на поверхности земли;
ΔT – разность температур на оси струи и воздуха на соответствующей высоте;
T_w – стратификация атмосферы;
γ_a – влажноадиабатический градиент температуры;
t – время;
τ_p – время на принятие природоохранного решения, включая время решения задачи прогноза;
$\tau_з$ – время распространения загрязнения;
$\tau_М$ – время реализации природоохранных организаций (мероприятий);
$\tau_р$ – время на принятие природоохранного решения, включая время решения задачи прогноза;
H_{TD} – толщина слоя перемешивания;
l_0, ΔZ – толщина слоя;
h – высота в метрах;
z_n – высота РСА;
$VD(\xi)$ – эмпирическая функция высоты;

$\Delta\theta_{ij}$, Δq_{ij}, $\Delta\delta_{ij}$, Δc_{ij}^{T}, Δc_{ij}^{Γ}, ΔT_{0j}, ΔW_{B0j} – антропогенные добавки в слое модели;

L – удельная теплота конденсации;
χ – отношение теплоемкостей;
ε – внешние притоки тепла;
H – турбулентный поток тепла;
L_w – скрытая теплота конденсации;
c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении;
Q_r – радиационная составляющая притока тепла;

H_i, Q_i, $i = \overline{1,3}$ – потоки тепла и влаги в направлениях x, y, z соответственно;

F – тепловой поток дымового выброса;
c_s, c^* – удельная теплоемкость почвы;
c_i – теплоемкость сухого грунта для соответствующего почвенного типа i;
c_p, c_v – удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме соответственно;
ε_π – лучистый приток тепла;
$\varepsilon_\Phi = \Phi_T$ – фазовый приток тепла (где Φ – удельная теплота парообразования);
$\Phi_{ПЛ}$ – удельная теплота плавления;
ε_R – внешние притоки тепла за счет радиации и других источников;
$J_s(x, y, t)$ – функция, описывающая антропогенные источники тепла;
J – интенсивность осадков;

$J_0^{\downarrow}$ – поток солнечной радиации на верхней границе атмосферы;

$J_0^{\uparrow}$ – поток, уходящий за пределы атмосферы радиации;

$J_0\downarrow$ – коротковолновая радиация, приходящая к поверхности почвы;
σ – среднее квадратическое отклонение;
g – ускорение силы тяжести;

$\frac{\tau}{\rho_0}$ – сила турбулентного трения, действующая на единицу объема смеси;
F – вектор массовых сил;
D – вектор диссипативных сил;
$G = G(q_1, q_2, q_3)$ – вектор ускорения силы тяжести;
δ_l – значение удельной водности, после достижения которой мелкие капли становятся гидрометеорами;
S_c^m – изменение удельной водности за счет слияния;
Δm^* – разность между отношениями смеси насыщения над водной поверхностью и надо льдом;
φ_i, f_i – непрерывные универсальные функции;
α_g – направление геострафического ветра в выбранной системе координат;
$\theta = \theta(\alpha)$ – дополнение до геодезической широты;
S_0 – кинетическая энергия вертикальных конвективных движений;
μ – функция распределения кучевых облаков внутри квадрата;
γ_a, γ_{ba} – сухо- и влажноадиабатические градиенты;
r – относительная влажность;
ρ_S – плотность поглощающих субстанций;
λ, θ – долгота и дополнение до широты места;
$\tau i,j$ $(i = \overline{1,3},\ j = \overline{1,3})$ – тензор вязких напряжений Рейнольдса;
γ – вертикальный градиент стандартной атмосферы;
m – общее число ингредиентов загрязнения;
C_i – концентрация i-й примеси;
H_Γ – геометрическая высота трубы;
$H_{\text{ЕФФ}}$ – эффективная высота трубы;
ΔH – высота подъема струи над трубой вследствие инерции движения и плавучести;
R_0 – радиус трубы;
H_0 φ_i, f_i – непрерывные универсальные функции;
E_0 – упругость насыщения водяного пара при температуре θ_0;
p – атмосферное давление;
ρ_s – плотность почвы;
ρ – плотность;
I_0 – приток суммарной коротковолновой солнечной радиации;
A_S – альбедо подстилающей поверхности;
F_s – эффективное длинноволновое излучение;
z_c – зенитный угол Солнца;
φ – широта местности;
γ – часовой угол Солнца;
ψ – склонение Солнца;
e – упругость водяного пара;
S_0 – солнечная постоянная;
α_r – угол падения солнечных лучей на поверхность;

ψ_α – азимут проекции нормали к склону на горизонтальную поверхность, отсчитываемый от плоскости меридиана;
$\overline{\eta}_i$ – объемное влагосодержание;
$\overline{\eta}_s$ – насыщающая влага или пористость почвы;
Q_s – поток влаги в почве;
z – вертикальная координата, определяемая как и в атмосфере;
p_A – атмосферное давление;
q – удельная влажность воздуха;
δ – водность воздуха;
c^T – концентрация твердых примесей;
c^v – концентрация газообразных примесей;
$q_{\text{НАС}}$ – удельная влажность насыщения;
$E_{\text{НАС}}$ – упругость насыщения водяного пара;
r_c, r_k – радиусы частиц примеси, капли;
r – альбедо поверхности почвы;
G_A – противоизлучения атмосферы;
U_0 – излучение земной поверхности;
ξ – глубина от поверхности почвы;
$W_{\text{В}}$, $W_{\text{П}}$ – удельная влажность жидкости и пара соответственно;
m_0 – объемный источник, отражающий взаимные фазовые переходы жидкости и пара;
$\Delta(\xi)$ – дельта-функция;
Π – пористость почвы;
$r_{N+1} = r_{\text{П}}$ – альбедо подстилающей поверхности;
s_0 – поток прямой радиации на верхней границе атмосферы (солнечная постоянная);
s_k – поток прямой радиации на уровне с давлением;
p_{Ak}, p_0 – давление у поверхности земли;
$M = f(h_0)$ – число оптических масс атмосферы;
h_0 – высота Солнца;
A_k – функция поглощения прямой солнечной радиации водяным паром;
$W_{k\infty}$ – содержание водяного пара в столбе единичного сечения с основаниями k, ∞ (в г/см^2);
e_k – функция поглощения длинноволнового излучения водяным паром;
R – радиус устья трубы;
q – объемная концентрация примеси;
IS – поле источников (мгновенных или непрерывных) выбросов, являющихся функцией пространства и времени;
r – радиус частиц;
SO_2 – сернистый ангидрид;
$q(\tilde{x}, t)$ – определенная концентрация примеси в точке $\tilde{x} = (x_1, x_2, x_3)$ в момент времени t, $x \in \Omega \cup \partial\Omega$;
$f(\tilde{x}, t)$ – обобщенная функция, характеризующая источники выбросов на местности;

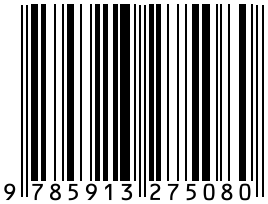
$Q_s(t)$ – мощность выброса l_s-го источника в момент времени t;
M_0 – начальный выброс;
M_{max} – максимальная мощность выброса;
M – амплитуда выброса;
$\bar{M}$ – среднее интервала колебания выброса;
τ – период;
$G(\varphi, y)$ – нелинейный дифференциальный оператор матричной структуры;
$Q(Dt)$ – пространство функций состояния, удовлетворяющих граничным условиям;
$f(x, t)$ – источники;
D – область изменения пространственных переменных;
C – концентрация примесей;
$A(C)$ – оператор трансформации примесей;
$f_0(x, t)$ – источник примесей;
$Q(t)$ – мощность выброса;
σ_y – дисперсия факела в поперечном ветру направлении y;
$\delta(z - h)$ – дельта функции Дирака;
v^* – динамическая вязкость;
s – расстояние вдоль оси струи;
r – расстояние от оси в поперечном сечении;
g – ускорение свободного падения.

Научное издание

Айдосов Аллаярбек
Айдосов Галым Аллаярбекович
Заурбеков Нургали Сабырович

МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ КОМПАНЕНТОВ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Монография



Компьютерный набор, корректура
и форматирование автора
Технический редактор Кулакова Г.А.
Подписано в печать 24.01.2018
Бумага офсетная.
Гарнитура NewtonC
Формат 60×84 1/16
Печать трафаретная. Печ. л. 21,38.
Тираж 550 экз. Заказ № 068-17.

Отпечатано в типографии ИД «Академия Естествознания»,
440026, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3