

УДК 551.509.328

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСГРАНИЧНОГО ВЫНОСА  
ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ОТ ВЫСОТНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

А.П. Шапов

*На основе нормативного документа ОНД-86 и данных о среднегодовой вероятности ветра различной скорости по направлениям разработана модель выноса загрязняющих веществ в заданном направлении в вероятностной форме. Представлен алгоритм программы расчета накопленной вероятности концентрации загрязняющих веществ. Приведены данные расчета и карты полей концентрации и вероятности загрязнения атмосферы диоксидом серы и диоксидом азота для Павлодар-Экибастузского промышленного района при юго-западном направлении ветра, опасном выносами загрязняющих веществ на территорию Российской Федерации.*

С развитием промышленности и транспорта зона загрязнения атмосферы повсеместно расширяется и отмечаются определенные негативные макромасштабные эффекты. В настоящее время наблюдается глобальное увеличение фоновой концентрации некоторых загрязняющих веществ (ЗВ) в районах, находящихся на больших расстояниях от промышленных центров. В связи с присоединением Казахстана к Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния, остро встает вопрос о методах расчета переноса загрязняющих веществ на большие расстояния. При этом актуальной задачей является оценка выноса этих веществ от отдельных промышленных районов и предприятий.

На территории Казахстана имеются крупные промышленные комплексы, выносы загрязняющих атмосферу веществ от которых могут достигать территории сопредельных государств, в частности, это предприятия городов Павлодара, Экибастуза и Аксу, которые находятся в Павлодарской области. Выносы ЗВ этого региона могут достигать Алтайского края Российской Федерации (РФ). Целью настоящей работы является создание модели, позволяющей определить выносы ЗВ из этого региона в сторону России при различных скоростях ветра и оценить вероятность таких выносов в зависимости от ветрового режима территории.

Существует четыре основных подхода к решению задач о рассеянии вещества в движущейся газообразной среде.

1. Прямое экспериментальное исследование связано с использованием инструментальных методов определения параметров загрязнения атмосферы и применяется для решения задач оперативного прогноза.

2. Теория подобия используется при моделировании переноса примесей в атмосфере в тех случаях, когда, в силу сложности рельефа местности и застроек, невозможно оценить граничные условия и направления воздушных потоков, поэтому для создания подобных условий приходится использовать гидравлическое или аэродинамическое моделирование в гидравлических лотках или аэродинамических трубах.

3. Теория диффузии загрязняющего вещества основывается на законе сохранения массы. Эта теория предполагает однородность основного движения по осям  $x$  и  $y$  и использование обычных приемов осреднения турбулентных характеристик воздушных потоков, состоящих из средних и пульсационных компонентов. Решение полуэмпирического уравнения диффузии широко применяют для расчетов примесей в атмосфере.

4. Классическая статистическая теория дает описание атмосферной турбулентности в терминах ее интенсивности, шкалы и спектральных свойств. Тип случайного процесса, который используется при изучении турбулентности и диффузии, может быть охарактеризован как стационарный, однородный, изотропный и гауссов [6]. Чаще всего статистическая теория используется для изучения диффузии вещества в горизонтальном направлении.

Большее распространение получили модели, основанные на решении уравнений диффузии. Существует четыре типа таких моделей известных как модели «клубка», «факела», «ящика» и модели конечно-разностного типа. Единой модели, способной объяснить и учесть все многочисленные аспекты проблемы атмосферной диффузии, не существует, поэтому важным этапом является выбор модели в наибольшей степени отвечающей решению поставленных задач. Были определены требования к математической модели расчета. Это должна быть мезомасштабная детерминированная модель, основанная на теории турбулентной диффузии, имеющая достаточно хорошее приближение к опытным результатам измерений. Из четырех основных типов детерминированных моделей для вычисления полей концентрации загрязняющих веществ на больших расстояниях от источника наиболее подходящей является модель «факела», которая к настоящему времени достаточно хорошо изучена и широко ис-

пользуется в научной и проектной практике для расчетов загрязнения атмосферы и предельно-допустимых выбросов (ПДВ) предприятий.

Имеется достаточно большое число реализаций моделей этого типа, предназначенных для расчетов на персональных компьютерах. В значительной степени условиям наших исследований отвечает программный комплекс ЭРА (версия 1.7) Новосибирской фирмы «Логос плюс», сертифицированный Главной геофизической обсерваторией им. Воейкова. Программный комплекс ЭРА создан на базе Общесоюзного нормативного документа ОНД-86 Госкомгидромета СССР [5], принятого на территории СНГ в качестве РД. Применение ПК «Эра» разрешено в Республике Казахстан. Методы расчетов, заложенные в ОНД-86, прошли длительную проверку и находят широкое применение [1, 5]. Существуют ограничения в применении этого метода по расстоянию. Так в работе [4] расстояние, на котором можно применять диффузионную модель оценивается в 200 км. РД ОНД-86 [5] рекомендует применять модель для получения нормативных величин загрязнения на расстояниях до 100 км. В настоящей работе автор счел возможным использовать, с некоторыми допущениями, эту модель.

В 2004 г. проводились работы по изучению загрязнения атмосферы г. Балхаш [2, 3]. Осуществленный в этих работах анализ влияния метеорологических параметров на перенос ЗВ в атмосфере используется в настоящей работе. При исследовании загрязнения атмосферы г. Балхаша был выполнен большой объем численного моделирования. В частности, выяснено влияние температуры воздуха на изменение конфигурации полей концентрации. Для этого были построены карты полей загрязнения атмосферы г. Балхаша диоксидом серы для скоростей ветра 0,5 и 5 м/с юго-западного направления при температуре воздуха  $-25^{\circ}\text{C}$  и  $+25^{\circ}\text{C}$ , а так же аналогичные карты для средней годовой температуры. Анализ полученных полей показал, что влияние температуры приземного слоя воздуха незначительно сказывается на их конфигурации. Различия в температурах приводит к некоторому смещению зоны с повышенной концентрацией по потоку. При низкой температуре воздуха ( $-25^{\circ}\text{C}$ ) и скорости ветра 0,5 м/с (т.е. практически при штиле) зона с повышенным загрязнением  $\geq 5$  ПДК смещена по потоку примерно на 800 м дальше, чем при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$ . Конфигурация зон, ограниченных изолиниями 0,5 ПДК и 1 ПДК, в обоих случаях одинаковы. Сдвиг зоны и точки с максимальной концентрацией объясняется увеличением высоты подъема струи при увеличении разности ее температуры с температурой окружающего воздуха. При скорости ветра 5 м/с

влияние температуры воздуха на поля приземной концентрации диоксида серы еще менее заметно – произошло увеличение максимальной концентрации при высокой температуре с 25,1 ПДК до 25,9 ПДК.

Незначительное влияние температуры воздуха на формирование полей приземной концентрации диоксида серы позволило нам использовать среднюю годовую температуру воздуха. Это может приводить при расчетах в условиях слабого ветра  $\leq 2$  м/с к пространственной ошибке местоположения зоны повышенного загрязнения ( $> 5$  ПДК) на несколько сот метров. Отсюда можно полагать, что при изучении загрязнения атмосферы на больших расстояниях от источника, влияние температуры воздуха на процессы переноса находится в пределах ошибки расчета.

Перенос ЗВ в различных направлениях от источника определяется ветровым режимом, в частности, вероятностью ветра различной скорости по направлениям. Поля концентрации, рассчитанные для ряда значений скоростей ветра, отличаются друг от друга по конфигурации, концентрация ЗВ в каждой точке исследуемого района, в зависимости от скорости и направления ветра, принимает разные значения. Если известен ветровой режим в исследуемом регионе, можно рассчитать поля концентрации для определенных скоростей ветра и вычислить поля концентрации ЗВ в вероятностной форме.

Для выполнения расчетов в ПК «Эра» были построены карты районов исследования, выполнена привязка источников выбросов в декартовой системе координат, введены параметры основных источников загрязнения и необходимые метеорологические параметры. Выносы на большие расстояния характеризуются, как правило, малыми концентрациями, поэтому для выполняемых расчетов и построения карт загрязнения были приняты следующие градации величин загрязнения: 0,01; 0,05; 0,1; 0,5 и  $\geq 1$  ПДК. Расчеты выполнены для скоростей 0,5; 3,5; 7,5; 11,5; 15,5; 19 и 22,5 м. Эти величины являются средними для диапазонов скоростей ветра, по которым рассчитаны таблицы вероятности ветров различной скорости по направлениям [7]. Данные этих таблиц используются в последующих расчетах вероятностей загрязнения.

Программный комплекс «Эра» предназначен для решения прикладных задач, в частности, проведения инвентаризации выбросов на предприятиях, расчетов приземных концентраций загрязняющих веществ в соответствии с методикой расчета концентраций ОНД-86 как для отдельных предприятий, так и для их совокупностей, а также выпуска полного комплекта документации томов ПДВ. Поскольку ПК «Эра» предна-

значен для получения конечного продукта, и использование промежуточных результатов вычислений представляет определенные технологические трудности, нами была разработана программа расчета полей концентрации ЗВ с накопленной вероятностью в «Excel». Алгоритм расчета полей загрязнения в ПК «Эра» представлен на рис. 1, а алгоритм расчета полей концентрации ЗВ с накопленной вероятностью в «Excel» – на рис. 2.

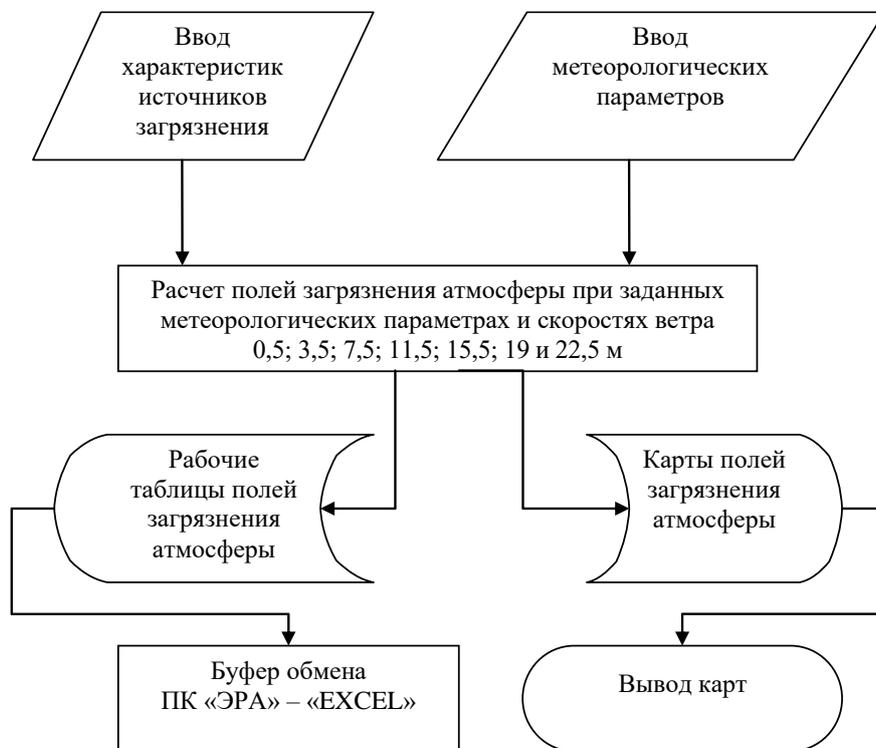


Рис. 1. Алгоритм расчета полей загрязнения атмосферы в ПК «Эра».

Расчет загрязнения атмосферы для Павлодарского промышленного района выполнялся по диоксиду серы и диоксиду азота.

В качестве входных параметров модели используются характеристики источников выбросов: высота трубы  $H$ , диаметр устья трубы  $d$ , вертикальная скорость истечения газа из трубы  $u$ , объем выбрасываемых газов  $V$  и их температура  $T$ , масса выбрасываемого в атмосферу в единицу времени вредного вещества  $M$ . Указанные параметры основных источников выбросов приведены в табл. 1. Поскольку целью настоящей работы является исследование дальних выносов, для расчетов использованы только те источники, высота которых превышает 80 м, полагая, что загрязне-

ние атмосферы от более низких источников носит локальный характер и не участвует в дальних переносах. Из метеорологических параметров используются скорость и направление ветра на высоте 10 м и среднегодовую температуру воздуха.



Рис. 2. Алгоритм расчета полей концентрации ЗВ с накопленной вероятностью.

Таблица 1

Исходные параметры источников выбросов Павлодарская обл. (Данные Павлодарского областного территориального управления охраны окружающей среды)

№ источника	Высота трубы, м	Диаметр устья трубы, м	Скорость истечения, м/с	Объем выброса, м <sup>3</sup> /с	Температура, °С	Эмиссия, г/с	
						SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>
ТОО «АЕС Экибастуз», 2002 г.							
1	300	11,9	13,9	1541,5	76	219,2	104,0
2	330	13,3	17,1	2354,5	80	574,8	260,2
АО «Экибастузская ГРЭС-2», 2002 г.							
3	420	13,0	13,9	1843,7	95	987,7	282,8
ТОО «Экибастузская теплоцентраль», 2003 г.							
4	120	4,2	4,6	63,0	76	22,3	4,5
5	180	6,0	11,5	325,7	92	172,4	34,4
АО «Алюминий Казахстана» ТЭЦ-1, 2002 г.							
6	150	7,0	11,6	444,5	95	19,4	2,4
7	240	7,8	15,5	741,1	70	814,8	194,9
АО «Павлодарэнерго» ТЭЦ-2, 2003 г.							
8	100	6,0	12,8	361,9	84,3	204,1	34,4
АО «Павлодарэнерго» ТЭЦ-3, 2003 г.							
9	180	7,2	15,1	614,8	71,4	304,9	87,6
АО «ЕЭК» Аксуская ГРЭС, 2004 г.							
10	180	7,6	11,9	539,8	156	368,1	82,9
11	180	7,6	22,9	1038,9	148	329,0	73,9
12	250	9,0	33,3	2118,5	158	1206,2	355,5

Расчеты по Павлодарской области выполнялись для юго-западного направления ветра, при котором возможен вынос загрязняющих веществ в Алтайский край РФ. Рассчитанные карты полей загрязнения приведены на рис. 3...5.

Необходимые для последующих вычислений рабочие таблицы концентраций в узлах расчетной сетки из ПК «Эра», рассчитанные для выбранных скоростей ветра, были транслированы в программу расчета полей концентрации ЗВ. Кроме того, в эту программу были введены данные о среднегодовой вероятности ветра различных скоростей по направлениям [7] (табл. 2).

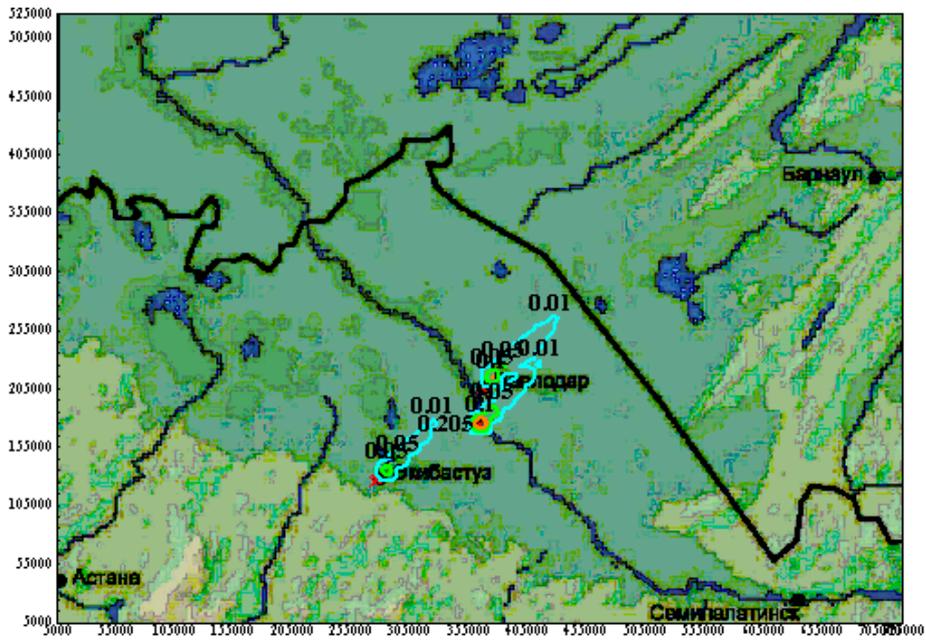


Рис. 3. Карта полей концентрации диоксида серы, скорость ветра 10,0 м/с.

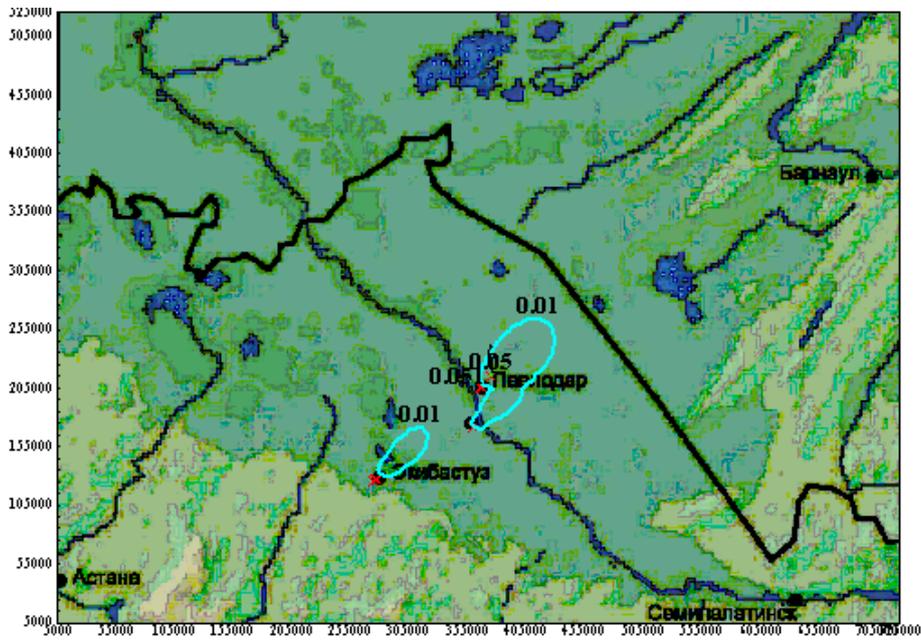


Рис. 4. Карта полей концентрации диоксида азота, скорость ветра 0,5 м/с.

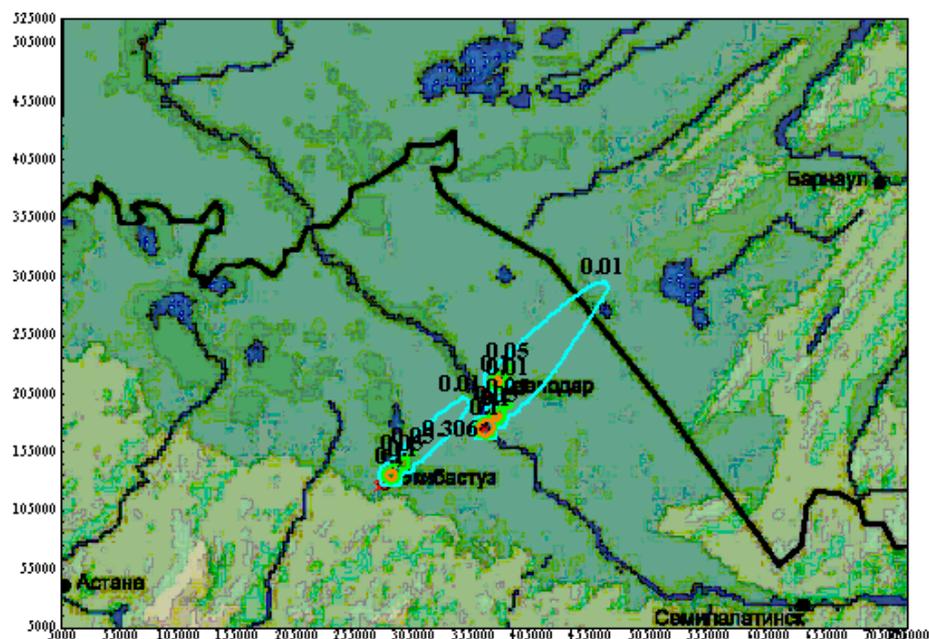


Рис. 5. Карта полей концентрации диоксида азота, скорость ветра 10,0 м/с.

Таблица 2

Среднегодовая вероятность ветра различной скорости по направлениям, (%).  
г. Павлодар.

Скорость ветра, м/с	Направление ветра							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
0...1	0,91	0,78	0,63	1,42	2,53	2,02	1,62	0,98
2...5	4,52	4,81	3,36	7,72	7,51	10,38	7,20	5,56
6...9	1,97	2,78	1,96	3,29	2,07	5,51	4,36	2,84
10...13	0,48	0,81	0,51	0,82	0,44	2,85	2,36	0,83
14...17	0,16	0,13	0,10	0,17	0,12	1,42	1,08	0,28
18...20	0,003	0,02	0,003	0,000	0,06	0,35	0,25	0,03
21...24	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,04	0,02	0,003
25...28	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,01	0,003	0,000
29...34	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,01	0,000	0,000

По этим данным были рассчитаны площади с различными уровнями загрязнения (табл. 3).

Результат вычислений по программе расчета вероятности загрязнения атмосферы представляет собой набор двумерных матриц накопленных вероятностей, вычисленных для выбранных уровней загрязнения (1, 0,5, 0,1, 0,05 и 0,01 ПДК) в узлах расчетной сетки.

Таблица 3

Площади с различными уровнями загрязнения диоксидом серы и диоксидом азота при различных скоростях ветра ( $\text{км}^2$ )

ПДК	Скорость ветра, м/с						
	0,5	3,5	7,5	11,5	15,5	19,0	22,5
$\text{SO}_2$							
$\geq 1$	0	0	0	0	0	0	0
$\geq 0,5$	0	0	0	0	0	0	0
$\geq 0,1$	0	100	100	100	75	50	50
$\geq 0,05$	100	225	275	275	225	200	200
$\geq 0,01$	6425	2250	2325	2525	2500	1325	1300
$\text{NO}_2$							
$\geq 1$	0	0	0	0	0	0	0
$\geq 0,5$	0	0	0	0	0	0	0
$\geq 0,1$	0	150	200	175	175	175	125
$\geq 0,05$	100	525	600	600	500	375	325
$\geq 0,01$	6425	4875	4925	4975	4975	2375	2450

По этим матрицам в программе обработки картографических изображений, например в Surfer, можно построить 2-х или трехмерные карты вероятностей загрязнения атмосферы различных уровней для исследуемого региона (рис. 6).

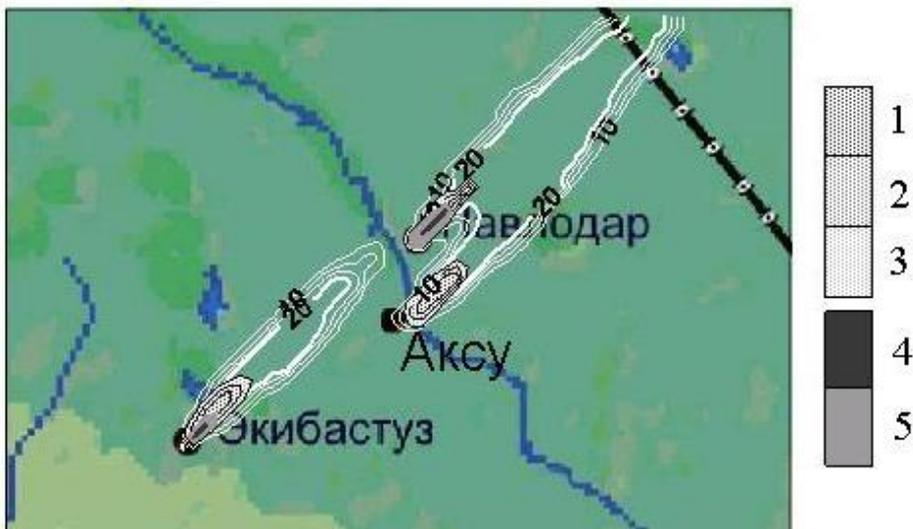


Рис. 6. Карта вероятности различных уровней загрязнения Павлодар-Экибастузского промышленного района при юго-западном направлении ветра. 1, 2, 3 – вероятность 15, 10 и 5% при уровне загрязнения 0,01 ПДК; 4, 5 – вероятность 10 и 5% при уровне загрязнения 0, 1 ПДК; изолиниями белого цвета нанесены поля вероятности при уровне загрязнения 0, 05 ПДК

По этой программе были вычислены накопленные вероятности приземных концентраций загрязняющих веществ по направлению оси факела на различных расстояниях от источника для опасного, юго-западного, направления ветра (табл. 4).

Таблица 4

Накопленные вероятности приземных концентраций загрязняющих веществ по направлению оси факела, при юго-западном направлении ветра, Павлодарская область

ПДК	Расстояние от источников, км							
	0	10	20	40	70	100	150	200
SO <sub>2</sub>								
≥ 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
≥ 0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
≥ 0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
≥ 0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,57	0,00	0,00
≥ 0,01	0,00	22,53	22,59	22,59	12,21	22,59	22,59	12,21
NO <sub>2</sub>								
≥ 1	0	0	0	0	0	0	0	0
≥ 0,5	0	0	0	0	0	0	0	0
≥ 0,1	0	0	0	0	0	2,03	0	0
≥ 0,05	0	0	6,29	0	0	4,27	5,86	0
≥ 0,01	0	22,59	16,3	22,59	22,59	16,3	16,68	22,53

Для Павлодарского промышленного района при переносе загрязняющих веществ в северо-восточном направлении, на расстоянии 200 км вероятность загрязнения диоксидом серы равна 12,2 %, а диоксидом азота 22,5 % на уровне 0,01...0,05 ПДК.

Таким образом, применение ПК «Эра» для оценки трансграничного переноса возможно на расстоянии 200 км от источника. Для оценки возможности применения модели на больших расстояниях от источника необходимо проведение дополнительных исследований.

Большой интерес представляет оценка вероятностных характеристик загрязнения атмосферы в исследуемом регионе с учетом характеристики ветра во всех направлениях. Такая программа, по сути, позволит получить климатические характеристики загрязнения атмосферы от источника для всей окружающей территории. К сожалению, в связи с сокращением ассигнований по теме, работы по совершенствованию модели и разработке рабочей программы расчета были приостановлены.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
2. Галаева О.С. и др. Метод количественного прогноза загрязнения атмосферы г. Балхаш диоксидом серы и пылью // Гидрометеорология и экология. – 2004. – №3. – С. 59-67.
3. Галаева О.С., Шапов А.П. Роль метеорологических параметров в загрязнении атмосферы города выбросами Балхашского горно-металлургического комбината // Гидрометеорология и экология. – 2004. – №3. – С. 47-58.
4. Метеорология и атомная энергия. Под ред. Слейда Д.Л. (Пер. с англ.) Л.: Гидрометеиздат. – 1971. – 648 с.
5. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86). – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 68 с.
6. Попов Н.С., Бодров В.И., Перов В.Л. Основные направления в моделировании загрязнения воздушного бассейна за рубежом // Химическая промышленность за рубежом. – 1982. – №6. – С. 10–33.
7. Справочник по климату СССР. Вып. 18. Ч. 3. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 520 с.

КазНИИЭК, г. Алматы

### **БИІКТІК КӨЗДЕРІНЕН ЛАСТАНҒАН ЗАТТАРДЫҢ ТРАНСШЕКАРАЛЫҚ ШЫҒАРЫЛУЫН МОДЕЛЬДЕУ**

А.П. Шапов

*ҚТҚ-86 нормативті құжаттың негізінде әр түрлі жылдамдықтағы желдің бағыты бойынша, оның орташа жылдық ықтималдығы туралы мәліметтер негізінде ықтималдық түрінде берілген бағыттағы ластаушы заттардың шығарылуының үлгісі жасалған. Ластаушы заттардың концентрациясының жиналған ықтималдылығын есептеу бағдарламасының алгоритмі келтірілген. Ресей Федерациясының аймағына ластаушы заттардың шығарылуымен қауіпті, желдің оңтүстік-батыс бағытында Павлодар-Екібастұз өнеркәсіп аймағы үшін атмосфераның күкірт пен азот диоксидтерімен ластану мәліметтерін есептеу және концентрация алаптарының картасы, сондай-ақ оның ықтималдығы келтірілген.*