

Академик РАН В.Е. Зуев, В.С. Комаров

## Метеорологические исследования в ИОА СО РАН в период 1980–1999 гг.

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 29.11.99 г.

Излагаются результаты многолетних метеорологических исследований, проведенных в Институте оптики атмосферы СО РАН в 1980–1999 гг. Рассмотрены проблемы физико-статистического моделирования вертикальной структуры и состава атмосферы, пространственно-временного прогноза мезометеорологических полей и создания баз данных и автоматизированных информационных систем.

### 1. Введение

Появление в последние десятилетия новых направлений наук о Земле, в частности, атмосферной оптики, дистанционного оптического зондирования и охраны окружающей среды, в реализации которых Институт оптики атмосферы СО РАН принимает самое активное участие, потребовало и значительного развития специальных исследований по прикладной метеорологии, направленных на метеорологическое обеспечение этих направлений.

Учитывая это, в ИОА СО РАН, начиная с 1980 г., были развернуты широкие научные исследования по различным проблемам прикладной метеорологии. Важную роль в их развитии сыграл директор института академик В.Е. Зуев. Он не только был инициатором подобных исследований, организовав лабораторию физической метеорологии (ЛФМ), но и всемерно поддерживал в дальнейшем их успешное выполнение.

Метеорологические исследования, развиваемые в лаборатории физической метеорологии, были ориентированы, в частности, на реализацию следующих основных научных направлений:

физико-статистическое моделирование вертикальной структуры и состава атмосферы;

пространственно-временной прогноз мезометеорологических полей;

разработка метеорологических баз и автоматизированных информационных систем.

При этом первое научное направление получило свое развитие сразу же после организации в ИОА лаборатории физической метеорологии. Это было обусловлено тем, что для оценки энергетических потерь распространяющегося в воздушной среде лазерного луча и решения обратных задач дистанционного оптического зондирования, являющихся в институте базовыми направлениями исследований по атмосферной оптике, возникла острая необходимость в получении (наряду с оптическими характеристиками) данных о распределении физических параметров атмосферы и, в частности, таких, как концентрация поглощающих газов, давление и температура воздуха. К тому же из-за существенного изменения значений этих параметров в пространстве и во времени и трудностей его учета на практике важно было иметь не климатические характеристики,

определяемые обычно по данным отдельных станций и неудобные для использования в численных и натурных экспериментах, а статистически обеспеченные модели атмосферы. По пути их построения и пошли специалисты ЛФМ.

Второе научное направление, связанное с пространственно-временным прогнозом мезометеорологических полей (т.е. полей с характерным масштабом от десятков до сотен километров), стало широко развиваться с начала 90-х гг., когда в Институте оптики атмосферы начали выполняться работы по различным проблемам экологического (в том числе лазерного) мониторинга атмосферы. Развитию нового направления метеорологических исследований способствовало также и участие ЛФМ в выполнении специальной тематики в области военной геофизики. Среди решаемых при этом проблем особое место заняла проблема разработки новых и нетрадиционных методов статистического восстановления и пространственно-временного прогноза мезометеорологических полей, которые обеспечивали бы гарантированный по качеству результат в условиях минимума исходной информации и частичной или полной неопределенности наших знаний о структуре моделируемого процесса и свойствах шумов в используемых данных.

И, наконец, третье научное направление стало развиваться с середины 90-х гг., когда возникла необходимость в построении баз данных и автоматизированных информационных систем, обеспечивающих полную автоматизацию всех звеньев сбора, обработки и отображения метеорологической информации и оперативную поддержку решения различных задач атмосферной оптики, лазерного зондирования атмосферы, охраны окружающей среды и военной геофизики.

В настоящей статье речь пойдет об основных результатах метеорологических исследований, полученных специалистами лаборатории физической метеорологии при реализации указанных научных направлений.

### 2. Основные результаты метеорологических исследований в области физико-статистического моделирования структуры и состава атмосферы

Известно, что к началу 80-х гг. в мировой практике наибольшее распространение получили только стандартные и справочные модели атмосферы, первые из которых



где  $\bar{\xi}_m^{(k)}$  – среднее площадное значение метеорологической величины  $\xi$  на уровне  $k$  (при  $k = 1, 2, \dots, K$ ), полученное для заданной широтной зоны;  $\bar{\xi}_i^{(k)}$  – среднее значение той же метеорологической величины на уровне  $k$ , относящееся к  $i$ -му узлу пятиградусной географической сетки;  $m$  – число взятых для усреднения узлов этой сетки.

В то же время для построения модельной ковариационной матрицы (она включает и дисперсию) использовалось выражение для оценки ее элементов, а именно:

$$R^{lh} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{(i)}^{lh} - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \bar{\xi}_i^l \cdot \bar{\xi}_i^h - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{\xi}_i^l \cdot \bar{\xi}_j^h \right), \quad (2)$$

где  $R_{(i)}^{lh}$  – ковариации метеорологической величины, рассчитанные по данным выборки  $i$ , взятой для какой-либо станции и месяца;  $\bar{\xi}_i^l$  и  $\bar{\xi}_i^h$  – средние значения той же метеорологической величины на уровне  $l$  и  $h$ , определенные по данным той же выборки;  $n$  – число статистических параметров, взятых для расчета матрицы  $\|R^{lh}\|$ .

В случае же, если речь шла о средних концентрациях МГС, то вместо формулы (1) использовалось выражение

$$\bar{s}_m = \left\| \begin{array}{l} \bar{s}^{(1)} = \frac{1}{n_1} \sum_{\mu=1}^{n_1} s_{\mu}^{(1)} \\ \dots \\ \bar{s}^{(k)} = \frac{1}{n_k} \sum_{\mu=1}^{n_k} s_{\mu}^{(k)} \end{array} \right\|. \quad (3)$$

Здесь  $\bar{s}^{(k)}$  – средняя концентрация малого газа на уровне  $k$ , полученная путем осреднения всех имеющихся в широтной зоне наблюдений за содержанием этого газа;  $s_{\mu}^{(k)}$  – индивидуальное значение концентрации того же газа в той или иной точке рассматриваемой зоны на том же уровне  $k$ ;  $n_k$  – число взятых наблюдений на уровне  $k$ .

Для оценки же модельных значений среднеквадратических отклонений концентрации тех же малых газов использовано следующие выражение:

$$\sigma_m = \left\| \begin{array}{l} \sigma^{(1)} = \sqrt{\frac{1}{n_1} \sum_{\mu=1}^{n_1} (s_{\mu}^{(1)} - \bar{s}^{(1)})^2} \\ \dots \\ \sigma^{(k)} = \sqrt{\frac{1}{n_k} \sum_{\mu=1}^{n_k} (s_{\mu}^{(k)} - \bar{s}^{(k)})^2} \end{array} \right\|, \quad (4)$$

где  $n_k$  – число наблюдений за содержанием малого газа на  $k$ -м уровне, которое имеется в рассматриваемой широтной зоне.

В табл. 1 в качестве примера приведена уточненная версия зональной модели атмосферы, построенная для умеренных широт и зимнего периода. Сразу же подчеркнем, что данная модель из-за большого объема статистического материала содержит лишь данные о распределении средних значений и среднеквадратических отклонений метеорологических величин.

Таблица 1

Зональные климатические модели молекулярной атмосферы для умеренных широт северного полушария

Высота, км	$p$ , гПа		$T$ , К		$q$ , г/кг		$P_3$ , мПа		$S_{CO_2}$ , млн <sup>-1</sup>		$S_{CO}$ , млн <sup>-1</sup>		$S_{CH_4}$ , млн <sup>-1</sup>		$S_{N_2O}$ , млн <sup>-1</sup>		$S_{NO}$ , млрд <sup>-1</sup>		$S_{NO_2}$ , млрд <sup>-1</sup>	
	$\bar{p}$	$\sigma_p$	$\bar{T}$	$\sigma_T$	$\bar{q}$	$\sigma_q$	$\bar{P}_3$	$\sigma_{P_3}$	$\bar{S}_{CO_2}$	$\sigma_{S_{CO_2}}$	$\bar{S}_{CO}$	$\sigma_{S_{CO}}$	$\bar{S}_{CH_4}$	$\sigma_{S_{CH_4}}$	$\bar{S}_{N_2O}$	$\sigma_{S_{N_2O}}$	$\bar{S}_{NO}$	$\sigma_{S_{NO}}$	$\bar{S}_{NO_2}$	$\sigma_{S_{NO_2}}$
0	1018	272	14,9	3,710	3,006	2,0	1,1	335	10,6	0,220	0,074	1,70	0,12	0,310	0,010	0,32	0,06	35,40	24,30	
2	790	267	10,4	1,920	1,510	2,6	1,2	329	14,8	1,006	0,026	1,70	0,10	0,310	0,031	0,11	0,07	9,35	3,69	
4	608	257	9,1	0,852	0,551	2,4	0,7	327	18,1	0,098	0,023	1,70	0,09	0,310	0,016	0,04	0,02	2,47	0,56	
6	463	244	8,8	0,351	0,304	2,2	0,7	327	18,2	0,091	0,023	1,70	0,05	0,310	0,006	0,01	0,01	0,65	0,09	
8	347	231	7,4	0,094	0,063	2,3	1,2	327	15,1	0,084	0,022	1,70	0,04	0,310	0,011	0,02	0,01	0,17	0,01	
10	257	220	4,8	0,014	0,008	3,8	2,9	327	13,4	0,059	0,019	1,70	0,03	0,310	0,012	0,08	0,04	0,92	0,29	
12	188	216	5,7	0,003	0,002	5,9	4,4	327	12,7	0,041	0,011	1,70	0,03	0,310	0,014	0,24	0,19	1,94	0,85	
14	135	215	5,4	0,002	0,001	7,1	5,0	327	14,0	0,028	0,008	1,50	0,03	0,310	0,017	0,45	0,23	2,15	1,77	
16	101	213	5,9	0,002	0,001	9,0	5,7	327	15,3	0,027	0,002	1,40	0,03	0,260	0,022	0,49	0,26	2,31	1,98	
18	74	214	5,9	0,002	0,001	12,1	5,4	327	16,3	0,025	0,002	1,30	0,03	0,210	0,043	0,52	0,29	2,40	2,26	
20	54	214	6,3	0,002	0,001	15,2	4,4	327	17,5	0,023	0,001	1,20	0,03	0,180	0,084	0,55	0,36	2,69	3,55	
22	39	215	6,3	0,002	0,001	15,0	3,7	327	18,3	0,022	0,001	1,12	0,05	0,150	0,073	0,59	0,40	3,33	4,27	
24	29	217	6,4	0,002	0,001	14,5	2,5	327	19,2	0,020	0,001	0,98	0,06	0,120	0,061	0,62	0,52	4,12	5,07	
26	21	219	6,8	0,002	0,001	13,0	1,9	327	20,1	0,019	0,001	0,88	0,04	0,100	0,050	0,85	0,72	5,11	6,00	
28	15	221	7,2	0,002	0,001	10,3	1,8	327	21,0	0,018	0,001	0,77	0,02	0,080	0,027	1,91	1,54	6,33	7,84	
30	11	223	8,0	0,003	0,001	7,8	1,6	327	21,9	0,017	0,002	0,67	0,02	0,070	0,020	3,18	2,24	7,84	8,34	
35	5,1	238	9,5	0,003	0,001	4,4	0,8	325	17,0	0,014	0,002	0,49	0,03	0,040	0,007	6,34	3,79	13,40	12,60	
40	2,5	253	13,2	0,004	0,001	2,0	0,3	324	13,1	0,021	0,002	0,38	0,05	0,013	0,003	9,41	6,71	22,90	20,56	
45	1,3	267	14,2	0,005	0,002	0,72	0,11	318	11,8	0,031	0,003	0,29	0,07	0,009	0,002	8,02	4,10	39,10	32,30	
50	0,68	271	12,9	0,005	0,002	0,20	0,03	314	9,5	0,040	0,005	0,22	0,10	0,003	0,002	6,50	3,01	31,60	24,10	
55	0,35	265	12,0	0,004	0,002	0,08	0,01	311	7,1	0,073	0,006	0,15	0,06	0,002	0,001	5,01	1,82	24,10	16,50	
60	0,18	258	11,1	0,003	0,001	0,02	0,01	308	4,8	0,110	0,008	0,06	0,02	0,001	0,001	3,51	1,05	16,50	8,90	

### 2.3. Региональные статистические модели атмосферы

Современная концепция метеорологического обеспечения различных задач атмосферной оптики и дистанционно-оптического зондирования предусматривает использование (наряду с зональными моделями) также и регио-

нальных статистических моделей атмосферы. Основу построения таких моделей составляют результаты прикладной объективной классификации климатов и климатического районирования территорий земного шара или его полушарий. Данный принцип был использован и нами при построении региональных моделей атмосферы. При этом в отличие от традиционных подходов к проблеме приклад-

ной классификации метеорологических объектов, основанных на применении только численных таксономических методов (например, кластерного анализа, факторного анализа, метода главных компонент и т.п.), не учитывающих физических свойств атмосферы и главных климатообразующих факторов, классификация климатов сводной атмосферы (о ней идет речь в нашем случае) проведена впервые по комплексу генетических, базирующихся на механизме общей циркуляции, и таксономических методов (их описание дается в [1, 2, 12]).

В частности, в основу генетической классификации положено деление земной поверхности на климатические зоны и области по характеристикам общей циркуляции атмосферы, а именно, таких как:

- зональная и меридиональная составляющие вектора среднего ветра,
- положение осей планетарных высотных фронтальных зон,
- положение пассатных фронтов и областей муссонной циркуляции,
- положение тропосферных зон конвергенции потоков тепла и влаги,
- положение внутритропической зоны конвергенции,
- положение областей обращения меридиональных потоков тепла и влаги, наблюдаемых в свободной атмосфере низких широт.

В то же время численная таксономическая классификация, реализованная вначале по комплексу «температура – влажность» [1, 2], а затем уже по комплексу «давление – температура – влажность – озон – ветер» [12, 13], проведена на основе метода главных компонент (он позволяет существенно сжать исходное признаковое пространство, характеризующее климатический режим свободной атмосферы), метода оценивания корреляций одноименных компонент на сфере и специальных статистических критериев их сходства. В качестве последних использованы:

1) критерии устойчивости (подобия) собственных векторов ковариационной матрицы  $\|R_{ij}\|$

$$r_{ml} = \left[ \sum_{\alpha=1}^p r_{\alpha}^{ml} \bar{\lambda}_{\alpha} \right] / \sum_{\alpha=1}^p \bar{\lambda}_{\alpha} \geq r_{\text{крит}} = \text{th } Z_{\text{крит}}, \quad (5)$$

где  $r_{\alpha}^{ml} = \sum_{i=1}^k F_{\alpha i}^{(m)} F_{\alpha i}^{(l)} = \cos(F_{\alpha}^m, F_{\alpha}^l)$  – коэффициент подобия

двух собственных векторов  $F_{\alpha}^m$  и  $F_{\alpha}^l$ , рассчитанных для  $m$ -й и  $l$ -й сравниваемых матриц (при  $m, l = 1, 2, \dots, M$ );  $\bar{\lambda}_{\alpha}$  – среднее арифметическое из собственных чисел одного и того же номера  $\alpha$ , полученных для тех же матриц;  $p = 3$  – число взятых для классификации собственных векторов;  $Z_{\text{крит}} = a \sigma_Z$  – критическое значение функции Фишера (здесь  $a = 3$ ,  $\sigma_Z = 1/\sqrt{N-3}$ , где  $N$  – объем выборки, определяемый порядком сопоставляемых матриц);

2) критерий оценки значимости расхождения норм ковариационных матриц  $\lambda_1$  (при  $\alpha = 1$ ), основанный на использовании критерия Кохрана:

$$G = S_j / \sum_{m=1}^M S_m \leq G_{0,05}(f, M), \quad (6)$$

где  $S_j$  – наибольшая из  $M$  сравниваемых норм матриц;  $G_{0,05}(f, M)$  – критическое значение критерия Кохрана, взя-

тое при 5%-м уровне значимости для числа степеней свободы  $f = k - 1$  (здесь  $k$  – порядок эмпирической матрицы), и некоторого числа  $M$ , равного числу сопоставляемых матриц.

В случае, когда выполнялись условия

$$r_{ml} \geq r_{\text{крит}}, \quad G \leq G_{\text{крит}}(f, M), \quad (7)$$

все сопоставляемые станции относились к тому или иному квазиоднородному району, где поля вариаций взятых метеорологических величин являются однородными по отношению к процессам глобального и синоптического масштабов.

Использование предложенной методики объективной классификации климатов и климатического районирования, осуществленного на примере северного полушария, позволило выявить вначале (когда в качестве метеорологических величин были взяты только температура и влажность воздуха) 20 квазиоднородных районов зимой и 17 – летом (результаты этого районирования приведены в [1, 2]). В то же время при использовании комплекса «давление – температура – влажность – озон – ветер», что было осуществлено позднее, та же методика позволила выявить на территории северного полушария уже 51 квазиоднородный район зимой и 48 – летом. Результаты этого климатического районирования приведены в [12, 13]. На рис. 1 в качестве примера представлено климатическое районирование северного полушария, проведенное по комплексу «давление – температура – влажность – озон – ветер» для зимнего периода.

Вторым важным этапом статистического моделирования (после классификации) был этап, связанный с построением региональных моделей атмосферы, описывающих адекватным образом состояние атмосферного канала во всех выявленных квазиоднородных районах северного полушария.

Подобные модели, как и зональные, содержат практически те же атмосферные параметры и статистики (см. [13, 14]). Отличием их от зональных моделей является лишь то, что они содержат также и характеристики ветра, представленные зональной ( $V_z$ ) и меридиональной ( $V_y$ ) составляющими, а в состав МГС входят только сильно изменчивые малые газы – CO, NO и NO<sub>2</sub>. При этом характеристики указанных газов содержатся в региональных моделях лишь для тех квазиоднородных районов, где проводились соответствующие экспериментальные измерения (в случае их отсутствия вместо региональных берутся среднезональные профили).

Для получения средних региональных профилей нами была использована та же процедура усреднения, что и при построении среднезональных профилей. В то же время модельные профили стандартных отклонений и корреляционные матрицы (они рассчитывались лишь для температуры, влажности и ветра, а в некоторых районах и для озона) определены по данным наблюдений опорных станций, расположенных вблизи центра рассматриваемого квазиоднородного района. Подобный подход вполне приемлем, поскольку вертикальная статистическая структура исследуемых метеорологических полей является однородной в пределах каждого из выявленных квазиоднородных районов.

В табл. 2 приведены в качестве примера региональные модели атмосферы, построенные для зимнего сезона и двух типичных квазиоднородных районов северного полушария, а именно, 2.3 и 3.5 (здесь первые цифры указывают на широтную зону, где 2 соответствует умеренной, 3 – субтропической зоне, а вторые цифры – на номер квазиоднородного района). Эти районы представляют Европейский и Северо-Американский регионы.

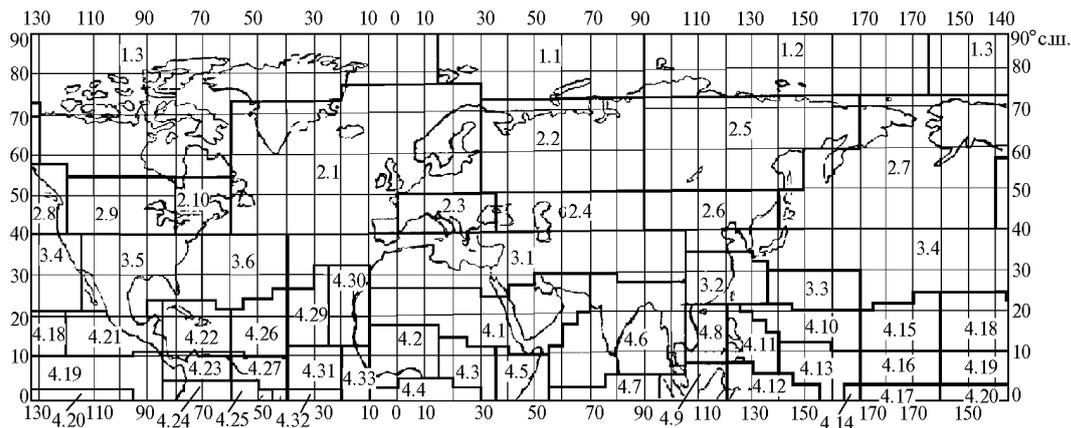


Рис. 1. Климатическое районирование северного полушария по комплексу «давление – температура – влажность – озон – ветер»

Таблица 2

Региональные климатические модели молекулярной атмосферы

Высота, км	$p$ , ГПа		$T$ , К		$q$ , г/кг		$P_3$ , мПа		$S_{CO_2}$ , млн <sup>-1</sup>		$S_{NO}$ , млрд <sup>-1</sup>		$S_{NO_2}$ , млрд <sup>-1</sup>		$V_x$ , м/с		$V_y$ , м/с	
	$\bar{p}$	$\sigma_p$	$\bar{T}$	$\sigma_T$	$\bar{q}$	$\sigma_q$	$\bar{P}_3$	$\sigma_{P_3}$	$\bar{S}_{CO_2}$	$\sigma_{S_{CO_2}}$	$\bar{S}_{NO}$	$\sigma_{S_{NO}}$	$\bar{S}_{NO_2}$	$\sigma_{S_{NO_2}}$	$\bar{V}_x$	$\sigma_{V_x}$	$\bar{V}_y$	$\sigma_{V_y}$
Квазиоднородный район 2.3 (зима)																		
0	1019	273,7	5,8	3,205	1,300	2,2	1,2	0,238	0,081	0,324	0,064	35,48	24,34	-1,1	3,0	1,6	2,5	
2	798	267,4	6,6	2,747	0,821	2,8	1,1	0,145	0,026	0,108	0,070	9,40	3,61	2,2	7,0	-1,6	8,3	
4	621	256,0	5,8	1,065	0,529	2,5	0,9	0,098	0,024	0,010	0,002	2,53	0,62	4,0	7,1	-3,3	9,0	
6	479	242,3	5,6	0,506	0,226	2,1	0,9	0,091	0,023	0,014	0,006	0,70	0,10	8,8	8,9	-4,8	11,7	
8	363	228,1	4,9	0,094	0,063	2,1	1,2	0,084	0,022	0,018	0,007	0,13	0,01	7,6	11,8	-5,4	14,7	
10	269	218,1	3,4	0,014	0,008	2,7	2,1	0,059	0,020	0,022	0,013	0,30	0,04	7,8	12,2	-6,3	15,1	
12	198	216,9	5,4	0,003	0,002	4,6	3,4	0,041	0,011	0,239	0,243	1,43	0,10	9,1	10,6	-6,6	12,9	
14	145	216,8	3,8	0,002	0,001	5,4	4,0	0,028	0,008	0,457	0,273	2,71	0,50	10,4	7,6	-5,8	8,5	
16	103	216,5	3,4	0,002	0,001	6,9	4,9	0,027	0,002	0,490	0,278	2,00	0,32	11,3	8,0	-4,8	7,8	
18	74	215,4	3,4	0,002	0,002	9,8	4,7	0,025	0,001	0,522	0,290	1,48	0,20	11,7	8,3	-3,9	6,7	
20	54	215,3	3,6	0,002	0,002	12,7	4,1	0,023	0,001	0,554	0,362	1,09	0,18	13,1	8,8	-3,6	6,2	
22	39	215,8	3,8	0,002	0,001	14,2	2,7	0,022	0,001	0,587	0,403	0,90	0,10	14,9	10,9	-3,1	7,4	
24	28	216,5	4,4	0,002	0,001	14,6	2,1	0,021	0,001	0,710	0,510	1,42	0,35	17,6	12,9	-1,8	8,7	
26	21	217,6	5,3	0,002	0,001	12,5	1,9	0,019	0,001	1,800	0,720	2,75	0,81	24,6	16,0	-0,4	10,9	
28	15	216,8	5,6	0,002	0,001	10,3	1,7	0,018	0,001	2,810	1,540	4,52	1,74	32,2	18,1	1,3	13,1	
30	11	218,0	6,5	0,003	0,001	8,1	2,0	0,017	0,002	3,904	2,240	6,82	2,62	40,1	20,1	3,9	16,2	
35	6	227,9	9,5	0,003	0,001	4,5	0,8	0,014	0,002	6,940	3,710	10,50	6,90	50,8	26,8	8,1	21,0	
40	3	253,0	13,2	0,004	0,001	2,0	0,3	0,021	0,002	12,050	6,710	19,30	15,30	59,6	36,4	12,8	21,5	
45	1,5	267,0	14,2	0,005	0,002	0,6	0,1	0,030	0,003	7,800	3,620	35,50	30,80	67,0	46,1	11,0	22,4	
50	0,8	271,0	12,9	0,005	0,002	0,2	0,03	0,040	0,005	5,010	2,190	28,00	24,50	69,1	50,1	6,4	25,9	
55	0,42	265,0	12,0	0,004	0,002	0,05	0,01	0,073	0,006	3,200	1,800	20,50	14,40	66,5	46,8	8,0	24,3	
60	0,22	258,0	11,1	0,003	0,002	0,02	0,01	0,106	0,011	2,040	1,050	12,90	7,70	60,6	41,9	9,3	23,3	
Квазиоднородный район 3.5 (зима)																		
0	1020	284,2	4,2	5,630	2,200	1,5	1,0	0,240	0,074	0,336	0,068	30,20	21,90	-1,9	4,1	1,6	2,0	
2	798	277,7	2,5	3,100	1,620	2,7	1,1	0,114	0,034	0,107	0,069	18,60	15,6	6,6	6,6	-1,4	7,0	
4	621	266,2	2,1	1,291	0,671	2,3	0,9	0,098	0,023	0,017	0,004	11,40	9,60	8,7	6,8	-1,6	7,6	
6	479	258,0	2,2	0,562	0,320	2,0	0,8	0,091	0,022	0,013	0,007	6,98	5,50	11,6	8,5	-0,5	9,1	
8	363	246,4	2,3	0,094	0,063	2,0	1,2	0,084	0,022	0,017	0,007	4,28	3,22	15,3	11,7	0,9	13,4	
10	269	231,3	1,9	0,016	0,009	3,0	2,6	0,059	0,019	0,022	0,013	2,63	1,86	18,2	11,3	0,9	12,7	
12	198	219,8	2,7	0,004	0,002	5,1	4,2	0,041	0,011	0,130	0,024	1,61	1,08	19,8	9,0	-0,7	8,4	
14	145	213,8	2,7	0,003	0,001	6,0	4,1	0,029	0,008	0,240	0,086	0,99	0,62	18,4	6,8	-1,2	7,2	
16	103	211,7	2,6	0,003	0,001	7,6	4,6	0,027	0,002	0,400	0,202	0,61	0,36	15,9	6,1	-1,6	5,6	
18	74	210,8	2,7	0,003	0,001	11,4	3,7	0,025	0,002	0,529	0,300	0,65	0,23	12,8	4,7	-0,6	4,1	
20	54	209,7	2,7	0,003	0,001	15,0	3,4	0,023	0,001	0,702	0,302	0,78	0,30	10,3	5,6	-0,2	3,4	
22	39	210,7	2,6	0,002	0,001	16,0	2,6	0,023	0,001	0,910	0,304	1,08	0,51	8,6	6,0	-0,2	3,3	
24	28	213,4	2,4	0,002	0,001	15,3	2,0	0,021	0,001	1,204	0,305	1,50	0,59	8,0	6,8	0,3	3,4	
26	21	216,5	2,3	0,002	0,001	12,5	1,6	0,023	0,001	2,200	0,470	2,08	0,67	10,2	7,9	1,9	3,7	
28	15	219,1	2,2	0,003	0,001	10,5	1,5	0,023	0,001	3,205	1,200	3,61	0,87	13,6	11,5	2,3	4,4	
30	11	224,2	3,5	0,003	0,001	7,5	1,4	0,024	0,002	4,203	2,501	4,50	2,26	17,1	16,2	4,2	5,1	
35	5	241,2	4,9	0,003	0,001	4,5	0,8	0,030	0,007	6,701	4,050	9,15	4,46	20,7	20,1	6,1	5,9	
40	2,5	254,2	6,2	0,004	0,001	2,0	0,3	0,033	0,009	9,010	6,800	18,5	13,8	30,3	25,3	7,2	10,3	
45	1,3	264,1	6,5	0,005	0,002	0,6	0,1	0,041	0,020	7,381	4,510	34,7	29,3	35,7	29,2	9,0	14,4	
50	0,7	266,2	6,6	0,005	0,002	0,2	0,03	0,080	0,063	6,910	3,000	31,2	23,70	45,8	30,0	12,2	15,6	
55	0,35	261,3	6,8	0,005	0,002	0,05	0,01	0,160	0,080	3,200	2,215	19,7	12,2	57,0	32,3	11,3	17,1	
60	0,18	252,9	6,7	0,004	0,001	0,02	0,01	0,300	0,110	1,800	1,205	12,1	4,50	68,7	33,1	7,4	20,2	

Сразу же отметим, что из-за большого объема статистического материала автокорреляционные матрицы, входящие в состав региональных моделей, здесь не приводятся (они представлены в [13]).

### 3. Основные результаты метеорологических исследований в области статистического прогнозирования мезометеорологических полей

В последние годы, наряду с задачами атмосферной оптики, появилась новая группа прикладных задач. К ним, в первую очередь, можно отнести задачи экологического мониторинга окружающей среды, связанные с оценкой и прогнозом процессов загрязнения атмосферы на ограниченных территориях (например, крупного города, промышленного района и т.п.), а также задачи геофизической поддержки войск при ведении боевых операций.

Для метеорологического обеспечения такого рода задач необходима разработка новых методов и алгоритмов пространственно-временной экстраполяции мезомасштабных метеорологических полей (в том числе и на несвещенную данными наблюдений территорию),

поскольку существующие традиционные (чаще всего регрессионные) методы не дают достаточно надежных результатов такой экстраполяции, а кроме того, они не могут быть реализованы при малом объеме экспериментальных измерений.

В связи с таким положением в институте начиная с 1991 г. были развернуты широкие фундаментально-прикладные исследования по новому научному направлению. Рассмотрим полученные при его реализации результаты (они опубликованы в [13, 15–26]).

#### 3.1. Методика и результаты статистической экстраполяции метеорологических величин по высоте

Данная задача реализована нами на базе оригинальной методологии, в основу которой впервые положен модифицированный метод группового учета аргументов (ММГУА) (его подробное описание дается в [13, 17]).

Сразу же подчеркнем, что этот метод хотя и относится к регрессионным методам, однако имеет перед ними существенные преимущества (судя по табл. 3).

Таблица 3

Основные отличия ММГУА от классических регрессионных методов

Модифицированный МГУА	Регрессионные методы
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ориентирован на использование оперативных данных минимального объема (<math>N = k + 1</math>, где <math>k</math> – число взятых атмосферных уровней) и не требует предварительного расчета (по многолетним наблюдениям) экстраполяционных параметров.</li> <li>2. Не требует выполнения условия, чтобы число исходных данных существенно превышало число определяемых коэффициентов.</li> <li>3. Базируется на многокритериальном выборе наилучшей прогнозирующей модели из множества синтезируемых моделей.</li> <li>4. Ориентирован на получение модели оптимальной сложности, что позволяет наиболее адекватно описать структуру сложных систем (в том числе метеорологических объектов).</li> <li>5. Основан на использовании (наряду с МГУА) метода минимаксного оценивания параметров модели, что позволяет получить (в условиях частичной или полной неопределенности наших знаний о структуре моделируемого процесса и свойствах шумов в исходных данных) оптимальную прогнозирующую модель и гарантированный прогноз состояния атмосферы.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ориентированы на использование многолетней режимной информации большого объема (при <math>N \geq 100</math>) и требуют предварительного расчета (по архивной выборке) экстраполяционных параметров.</li> <li>2. Требуют выполнения условия, чтобы число исходных данных существенно превышало число определяемых коэффициентов.</li> <li>3. Базируются на применении одного критерия регуляризации, позволяющего получить лишь одну модель, которая не является лучшей.</li> <li>4. Основаны на использовании слишком простых моделей (линейных или второй степени), что не позволяет описать на должном уровне структуру сложных систем.</li> <li>5. Основаны на использовании метода наименьших квадратов, который заранее вносит в результаты вычислений погрешность метода, заключающуюся в сглаживании экстремальных значений.</li> </ol>

Основная идея ММГУА состоит в том, что на основе ограниченной выборки пространственно-временных наблюдений за метеорологической величиной вида

$$\{\xi_{h,t}, h = 0, 1, \dots, h_k; t = 1, 2, \dots, N\}, \quad (8)$$

$$\{\xi_{h,t}, h = 0, 1, \dots, \bar{h} \leq h_k; t = 1, \dots, N + 1\}$$

и в заданном классе базисных функций, в качестве которых используется смешанная разностная динамико-стохастическая модель

$$\xi_{h,N+1} = \sum_{\tau=1}^{N^*} A_{h,\tau} \xi_{h,N+1-\tau} + \sum_{j=1}^{h-1} B_{h,j} \xi_{j,N+1} + \varepsilon_{h,N+1}; h = \bar{h} + 1, \dots, h_k \quad (9)$$

(здесь  $h$  – высота;  $h_k$  – максимальная высота наблюдений;  $t$  – время наблюдений;  $N = k + 1$  – объем используемых измерений, где  $k$  – число взятых уровней;  $N^*$  – порядок запаздывания по времени,  $N^* < (N - h - 1)/2$ ;  $A_{h,1}, \dots, A_{h,N^*}$  и  $B_{h,0}, \dots, B_{h,h-1}$  – неизвестные параметры модели;  $\varepsilon_{h,N+1}$  – невязка модели), генерируется некоторое множество прогнозирующих моделей различной структуры, из которого выбирается одна единственная модель с наилучшей структурой. Алгоритм выбора наилучшей модели подробно описан в [13, 17, 26], поэтому здесь не будем на нем останавливаться.

Рассмотрим теперь результаты использования ММГУА в процедуре статистической экстраполяции метеорологических величин по высоте. Первая попытка реше-

ния подобной задачи на основе алгоритма ММГУА была предпринята еще в 1994 г. [16]. Однако из-за ограниченности взятого экспериментального материала полученные результаты, несмотря на их приемлемую для практики точность, требовали дальнейшего подтверждения на базе более полных данных. Это было осуществлено позднее, причем наиболее надежные результаты статистической экстраполяции (восстановления) профилей метеорологических величин (на примере температуры и составляющих скорости ветра) были приведены в [26]. В данной работе для статистической оценки качества указанной экстраполяции, проведенной с помощью алгоритма ММГУА, были использованы массивы многолетних (1971–1978 гг.) радиозондовых наблюдений 5 аэрологических станций: «Варшава» (52°11' с.ш., 20°58' в. д.), «Каунас» (54°53' с. ш., 23°23' в. д.), «Брест» (52°07' с.ш., 23°41' в.д.), «Минск» (53°11' с.ш., 27°32' в.д.), «Львов» (49°49' с.ш., 23°51' в.д.).

Поскольку процедура экстраполяции в [26] рассматривалась применительно к прогнозу пространственного распространения облака загрязняющих веществ, то в качестве исходных данных брались не измерения температуры и ветра на отдельных уровнях, а результаты их усреднения по вертикали в слоях  $h - h_0$ , где  $h_0 = 0$  совпадает с уровнем земной поверхности. При этом расчет среднелосных

значений (или просто средних) был осуществлен с помощью выражения

$$\langle \xi \rangle_{h_0, h} = \frac{1}{h - h_0} \int_{h_0}^h \xi(z) dz, \quad (10)$$

где  $\xi$  – метеорологическая величина;  $z$  – высота, а знак  $\langle \bullet \rangle$  обозначает процедуру усреднения данных по вертикали.

В табл. 4 приводятся стандартные погрешности  $\delta_\xi$  и вероятности  $P$  ошибок экстраполяции (менее или более заданной величины) среднелосных значений температуры, зонального и меридионального ветра для станций «Варшава» и «Львов», полученные для отдельных слоев атмосферы и летнего сезона, когда в умеренных широтах отмечаются слабые корреляционные связи. Из табл. 4 следует, что использование алгоритма ММГУА для статистической экстраполяции средней температуры и составляющих среднего ветра дает вполне приемлемые для практики результаты. Даже для слоя 0–8 км стандартные погрешности не превышают 2,2–2,3° и 2,2–2,6 м/с. В то же время для слоя 0–1,6 км, где осуществляется основной перенос техногенных загрязнений, эта погрешность существенно меньше по своей величине и составляет всего 1,2–1,3° для средней температуры и 1,9–2,2 м/с для составляющих среднего ветра.

Таблица 4

Среднеквадратические погрешности ( $\delta$ ) и вероятности ( $P$ ) ошибок экстраполяции среднелосных значений температуры, зонального и меридионального ветра менее и более заданной величины, проведенной с помощью алгоритма ММГУА для станций «Варшава» (1) и «Львов» (2)

Слой, км	Вероятность, $P$ ( $\times 10^2$ )										$\delta$	
	$\leq \pm 1$		$\leq \pm 2$		$\leq \pm 3$		$\leq \pm 4$		$> \pm 4$			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Температура, °C												
0–0,2	92	90	98	100	100	100	100	100	0	0	0,6	0,6
0–0,4	90	88	96	100	98	100	100	100	0	0	0,8	0,7
0–0,8	76	64	94	92	96	100	100	100	0	0	1,0	1,1
0–1,6	56	52	86	88	96	96	100	100	0	0	1,2	1,3
0–3,0	44	48	80	76	92	90	98	97	2	3	1,6	1,7
0–5,0	40	47	75	74	90	89	96	94	4	6	1,8	2,0
0–8,0	36	44	74	73	88	86	94	91	6	9	2,2	2,3
Зональный ветер												
0–0,2	84	86	98	98	100	99	100	100	0	0	0,7	0,9
0–0,4	70	67	96	92	100	98	100	100	0	0	1,2	1,3
0–0,8	48	50	88	88	96	94	100	100	0	0	1,6	1,6
0–1,6	44	46	78	75	86	88	97	96	3	4	1,9	2,0
0–3,0	40	43	76	73	84	84	94	94	6	6	2,1	2,2
0–5,0	39	41	75	71	83	83	93	92	7	8	2,2	2,3
0–8,0	38	39	73	71	82	82	92	92	8	8	2,2	2,3
Меридиональный ветер												
0–0,2	96	80	100	92	100	100	100	100	0	0	0,4	0,8
0–0,4	84	72	95	88	100	100	100	100	0	0	0,9	1,0
0–0,8	78	56	84	79	100	94	100	100	0	0	1,0	1,6
0–1,6	48	48	76	76	88	85	98	92	2	8	1,7	2,2
0–3,0	44	40	74	73	85	81	95	90	5	10	2,0	2,4
0–5,0	42	38	74	72	84	81	94	89	6	11	2,1	2,6
0–8,0	40	37	73	71	82	80	93	87	7	13	2,2	2,6

В заключение следует сказать, что успешная апробация алгоритма ММГУА осуществлялась также при решении и других задач, связанных, в частности, с восстановлением профилей ветра в пограничном слое по

данным ветровых лидарных измерений [13, 22] и с предвычислением температурной стратификации и того же ветра в подоблачном слое атмосферы, проводимым по наблюдениям на вышележащих уровнях, где обычно

имеются в достаточном количестве спутниковые измерения [13, 27, 28].

### 3.2. Пространственная экстраполяция (прогноз) и интерполяция мезометеорологических полей

Среди современных и актуальных проблем прикладной метеорологии важное место, наряду с процедурой восстановления, занимает проблема пространственной экстраполяции (прогноза) и интерполяции мезометеорологических полей. Это обусловлено двумя причинами. С одной стороны, результаты пространственной экстраполяции подобных полей, особенно на неосвещенную данными наблюдений территорию, имеют первостепенное значение для метеорологического обеспечения войск во время ведения боевых действий, а результаты интерполяции (основы объективного анализа) тех же полей необходимы для оперативной оценки (с помощью уравнения переноса примеси) распространения загрязняющих веществ в ограниченном воздушном бассейне. С другой стороны, применяемые в схемах объективного анализа методы пространственной интерполяции и экстраполяции (например, методы оптимальной интерполяции, полиномиальной и сплайновой аппроксимации) не дают надежных результатов в районах с редкой сетью станций, а также в случаях прогноза полей на неосвещенную данными наблюдений территорию.

Учитывая все это, сотрудниками ЛФМ в последние годы был проведен цикл исследований по оценке возможностей алгоритма ММГУА при его использовании в задачах пространственного прогноза и интерполяции мезометеорологических полей. Правда, ввиду того что алгоритм ММГУА базируется на учете лишь высотно-временной структуры этих полей в районе станции, он был дополнен широко распространенным методом оптимальной экстраполяции (интерполяции). Эта комплексная методика и соответствующий алгоритм подробно описаны в [13, 17, 20, 23, 25, 26], поэтому здесь их рассматривать не будем.

Напомним лишь, что метод оптимальной экстраполяции (интерполяции) сводится к определению значений централизованного поля  $\xi$  в точке  $r_0 \notin W_x \subset R^m$  ( $r_0 \in W_x \subset R^m$ ) по его измерениям в точках  $r_i \in W_x \subset R^m$  (здесь  $r$  – радиус-вектор;  $i = 1, 2, \dots, n$  – число взятых точек;  $W_x$  – некоторое замкнутое множество конечномерного евклидова пространства) с помощью выражения

$$\xi(r_0) = \sum_{i=1}^n a_i \xi(r_i), \quad (11)$$

где  $a_i$  – весовые коэффициенты.

Для оценки коэффициентов используется система линейных уравнений вида

$$\sum_{j=1}^n a_j \mu_{ij} + a_i \eta^2 = \mu_{0i}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

где  $\mu_{ij}$  и  $\mu_{0i}$  – значения пространственных корреляционных функций метеорологической величины;  $\eta^2 = \Delta^2 / \sigma_x^2$  ( $\Delta^2$  – дисперсия ошибки измерения,  $\sigma_x^2$  – дисперсия этой величины) – мера ошибки наблюдений.

Отметим, что для аппроксимации пространственной корреляции (применительно к приземному уровню, на котором осуществлялись оптимальная экстраполяция и интерполяция), нами предложены следующие аналитические функции [29]:

для температуры

$$\mu_T(\rho) = [\exp(-\alpha\rho)] \cos(\beta\rho), \quad (13)$$

для зонального и меридионального ветра

$$\mu_{V_x}(\rho) = \mu_{V_y}(\rho) = (1 - \alpha\rho) \exp(-\rho)^2, \quad (14)$$

где  $\rho$  – расстояние, тыс. км;  $\alpha = 0,436$  и  $\beta = 0,863$  для температуры;  $\alpha = 1,162$  – для составляющих скорости ветра.

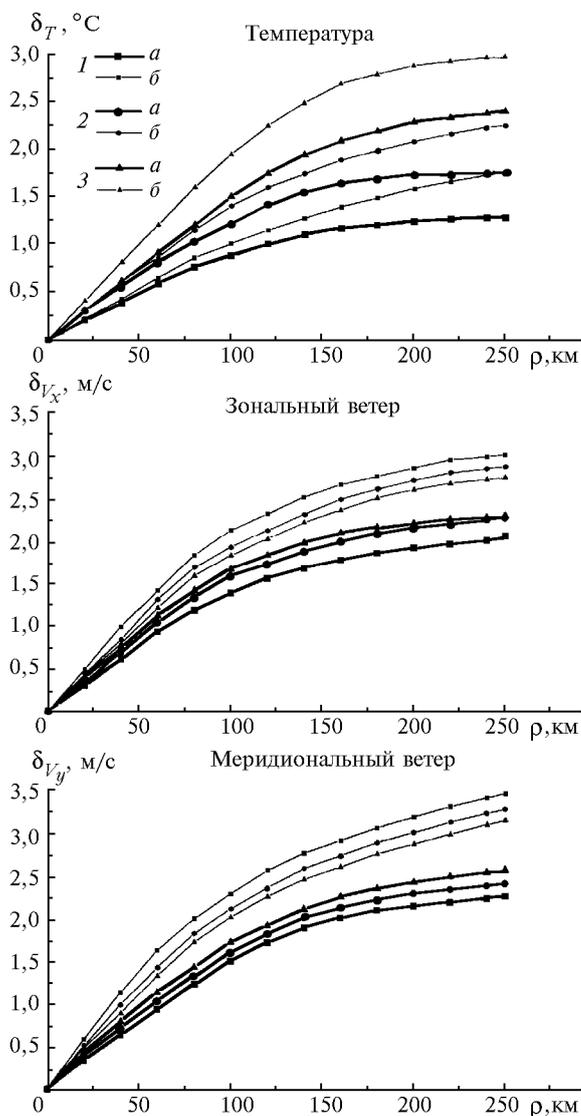


Рис. 2. Зависимость среднеквадратической ошибки  $\delta_{\xi}$  пространственного прогноза среднепослойных значений температуры, зонального и меридионального ветра от расстояния  $\rho$ , проведенного для слоев 0–0,4 (1), 0–2,0 (2) и 0–5,0 км (3) на основе комплексного алгоритма (а) и методом оптимальной экстраполяции (б)

На рис. 2 в качестве примера представлена зависимость среднеквадратической погрешности комплексной пространственной экстраполяции среднепослойных значений температуры и составляющих скорости ветра от расстояния  $\rho$ , полученная для лета и трех атмосферных слоев: 0–0,4; 0–2,0 и 0–5,0 км, по данным наблюдений тех же 5 аэрологических станций, а также по результатам аналогичных

расчетов, но до меньших расстояний [13]. На этом же рисунке (для сравнения) приведены среднеквадратические отклонения пространственного прогноза тех же параметров, но осуществленного лишь на основе одного метода оптимальной экстраполяции.

Анализ полученных зависимостей позволил установить, что комплексный алгоритм дает вполне приемлемые для практики результаты, которые к тому же существенно лучше (на 25–30%), чем при использовании метода оптимальной экстраполяции.

О результатах точностной оценки алгоритма ММГУА при его использовании в процедуре объективного анализа можно судить из работ [13, 20, 25].

### 3.3. Сверхкраткосрочный прогноз вертикальных профилей зонального и меридионального ветра

Наряду с пространственной экстраполяцией алгоритм ММГУА оценивался также и при его использовании в задаче сверхкраткосрочного (на срок до 12 ч) прогноза среднеслойных значений составляющих вектора ветра в пограничном слое атмосферы, поскольку данные об этих параметрах необходимы для предвычисления возможных изменений уровня загрязнений в ограниченном воздушном бассейне (например, индустриального центра или крупного города).

При этом подобный прогноз, как и пространственный, базировался на использовании процедуры комплексирования двух методов, а именно метода оптимальной экстраполяции случайного процесса и ММГУА. Подробное описание данной процедуры и результатов ее применения при решении поставленной задачи дается в [21, 22].

Подчеркнем лишь, что метод оптимальной экстраполяции случайного процесса, используемый для предварительной оценки составляющих скорости приземного ветра в срок  $t + \tau$  ( $\tau$  – величина упреждения), базируется на применении выражения вида

$$\hat{\xi}(t + \tau) = \hat{\xi} + \sum_{k=0}^n a_k \xi'(t - k), \quad (15)$$

где  $\hat{\xi}$  – норма (для стационарного процесса  $\hat{\xi}(t) = \hat{\xi} = \text{const}$ );  $\xi'(t - k)$  – отклонение метеорологической величины от нормы в предшествующие моменты времени  $t - k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, n$ );  $a_k$  – некоторые весовые коэффициенты, определяемые на основе решения системы линейных уравнений

$$\sum_{j=0}^n a_j \mu_{\xi}(k - j) = \mu_{\xi}(t + k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

В формуле (16)  $\mu_{\xi}$  – нормированная корреляционная функция, рассчитываемая с помощью предложенной нами аналитической аппроксимации вида [21]:

$$\mu_{V_x}(\tau) = \mu_{V_y}(\tau) = \exp[-\alpha(\tau)], \quad (17)$$

где  $\alpha = 0,275$  для зонального и  $0,537$  для меридионального ветра.

Как показали результаты численных экспериментов, приведенных по данным 6-срочных (2, 6, 10, 14, 18, 22 ч) измерений трехтрассового корреляционного лидара (эти данные получены для Томска ( $56^\circ$  с.ш.,  $85'$  в.д.) в период 10 июня – 12 августа 1994 г.), использование в поставленной задаче комплексного алгоритма дает вполне

приемлемую для практики точность сверхкраткосрочного прогноза (особенно при  $\tau = 4$  ч, когда среднеквадратические погрешности варьируют во всем пограничном слое в пределах  $0,6$ – $2$  м/с).

## 4. Результаты метеорологических исследований в области построения баз метеорологических данных и автоматизированных информационных систем

Известно, что применение системы автоматизации позволяет не только обеспечить ввод, обработку и хранение больших объемов экспериментальной информации, но и осуществить оперативное решение сложных математических задач, в том числе и задач прогнозирования.

Учитывая это, в ЛФМ с 1992 г. стали вестись широкие исследования по разработке баз метеорологических данных и созданию автоматизированных систем обработки и отображения метеорологической информации. Рассмотрим кратко полученные результаты (в полном объеме они приведены в [30–32]).

### 4.1. База региональных климатических моделей молекулярной атмосферы

Создание базы региональных моделей молекулярной атмосферы было первой разработкой ЛФМ в области автоматизации. Эта база создавалась для обеспечения оперативности использования региональных моделей при решении задач проектирования и летных испытаний космической аппаратуры, оценки влияния воздушной среды на перенос оптического излучения, интерпретации спутниковых измерений и данных лазерной локации и т.п. База региональных моделей предназначена:

- для систематизации и оптимальной организации хранения и доступа к региональным моделям молекулярной атмосферы;
- поиска требуемой модели в соответствии с запросом пользователя;
- представления характеристик модели в табличном виде;
- экспорта параметров требуемой модели в автоматизированные системы различного целевого назначения (например, в системы, предназначенные для метеорологической поддержки локально-регионального мониторинга атмосферных загрязнений [31]).

Отметим, что описание моделей молекулярной атмосферы, которые содержатся в рассматриваемой информационной базе, здесь не дается, поскольку оно приведено выше.

Процедура проектирования базы региональных моделей основывается на известной методологии проектирования баз данных DATAID-1 (она дается в [30]). На рис. 3 в качестве примера приведена глобальная операционная схема базы региональных моделей молекулярной атмосферы.

Пространственная организация этой базы представляет собой набор статистических характеристик метеорологических величин, входящих в состав региональных моделей и соответствующих одному из выявленных квазиоднородных районов северного полушария, каждый из которых описывается упорядоченными значениями географических координат его узлов, взятых с точностью до  $2,5^\circ$ .

Выбор требуемой региональной модели осуществляется путем задания поисковых элементов: сезона, геогра-

фических координат точки, метеорологической величины и статистического параметра.

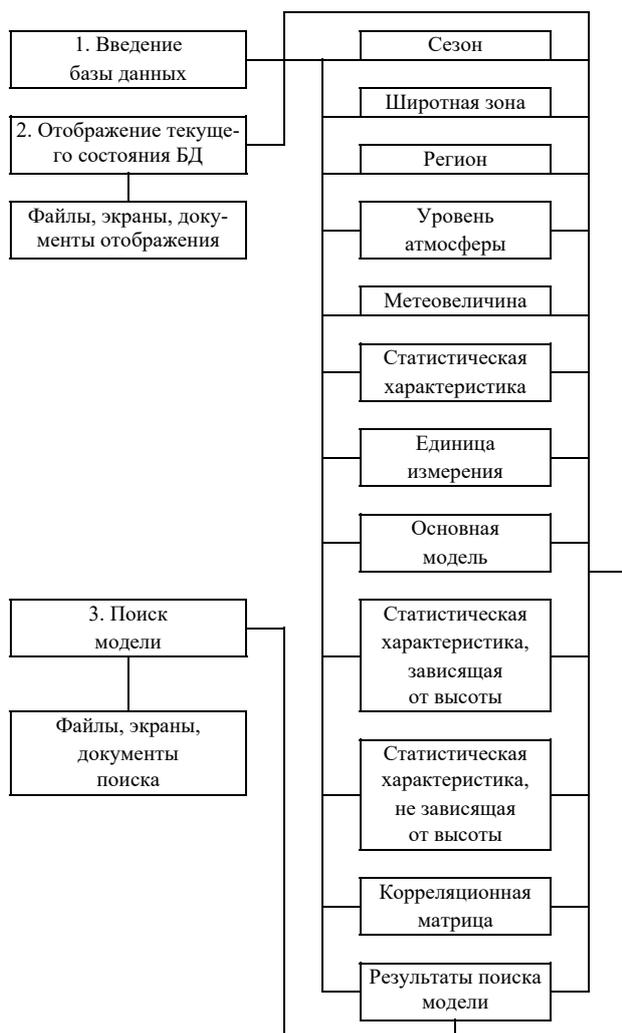


Рис. 3. Глобальная операционная схема базы региональных моделей атмосферы

База региональных моделей молекулярной атмосферы реализована с помощью СУБД Paradox 4.0 компании Borland Inc.

Наряду с описанной выше базой, специалистами ЛФМ в самые последние годы начаты разработки по созданию базы региональных моделей пограничного слоя атмосферы. Эта база включает в свой состав параметры указанных моделей, представленных модельными профилями вертикального распределения средних значений и среднеквадратических отклонений давления, температуры, влажности и составляющих скорости ветра до высоты 2 км, а также автокорреляционными матрицами тех же метеорологических величин.

Региональные модели пограничного слоя атмосферы строятся для зимы и лета в системе геометрических высот, содержащей такие уровни, как 0 (уровень поверхности Земли), 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1200, 1600 и 2000 м.

Проектирование базы проведено по той же методологии, что была взята при проектировании базы региональных моделей молекулярной атмосферы. Описание особенностей проектирования базы региональных моделей по-

граничного слоя атмосферы и первой версии этой базы дается в [32].

## 4.2. Автоматизированные информационные системы

Работы в области построения автоматизированных информационных систем, предназначенных для метеорологической поддержки решения прикладных задач, начаты в ЛФМ лишь с 1995 г. К настоящему времени создана только первая версия такой автоматизированной системы, один из вариантов которой, разработанный применительно к метеорологическому обеспечению локально-регионального мониторинга атмосферных загрязнений, подробно описан в [31].

Ниже рассматривается более общий и многоцелевой вариант автоматизированной системы, в реализации которой использованы все вышеописанные алгоритмы пространственно-временного прогноза мезометеорологических полей.

Эта система, представленная в виде автоматизированного рабочего места геофизика (АРМ-геофизик), разработана в виде многофункционального и профессионально ориентированного вычислительного комплекса.

На рис. 4 приведена общая конфигурация АРМ-геофизик, которая включает в себя 7 подсистем и интерфейс пользователя, обеспечивающий их работу.

Дадим краткую характеристику каждой из этих подсистем.

1. *Подсистема информационных баз* предназначена для поддержки решения основных задач, связанных с численным прогнозом мезометеорологических полей по пространству и времени. Она включает в свой состав две базы, а именно:

- базу региональных климатических моделей атмосферы, содержащих модельные профили высотного распределения средних значений (норм) и среднеквадратических отклонений температуры, зонального и меридионального ветра до высоты 30 км, которые получены для квази-однородных районов северного полушария, выявленных в процессе объективной классификации климатов свободной атмосферы (методика и результаты такой классификации приведены выше);
- базу оперативной и режимной аэрологической информации, предназначенной для систематизации, хранения и формирования архивов оперативных данных, поступающих в виде бюллетеня «МЕТЕО-11» (он содержит данные о среднепоисловых значениях температуры и характеристик ветра), а также архивов обобщенных данных, представленных постанционными значениями норм и среднеквадратических отклонений тех же метеорологических величин.

2. *Подсистема обработки и преобразования входной информации* предназначена для интерактивного ввода аэрологической информации, поступающей в виде бюллетеней «МЕТЕО-11», выбора требуемых данных и их преобразования в заданный формат.

3. *Подсистема восстановления высотных профилей метеорологических величин* предназначена для решения задачи численного восстановления среднепоисловых значений температуры, зонального и меридионального ветра по наземным данным и наблюдениям, взятым в предшествующие сроки.

4. *Подсистема сверхкраткосрочного прогноза высотных профилей метеорологических величин* предназначена для решения задачи сверхкраткосрочного прогноза (на

срок до 6 ч) средней температуры, зональной и меридиональной составляющих вектора среднего ветра в районе аэрологической станции.

5. Подсистема пространственного прогноза высотной структуры мезометеорологических полей предназна-

чена для решения задачи пространственной экстраполяции мезомасштабных полей температуры и ветра на неосвещенную данными наблюдений территорию (на глубину до 250 км). При этом указанная задача реализуется с помощью двух алгоритмов.



Рис. 4. Блок-схема АРМ-геофизик

Первый из них применяется тогда, когда число высотных наблюдений  $N < k + 1$  (здесь  $k$  – количество взятых уровней или слоев атмосферы). В этом случае пространственный прогноз осуществляется на основе метода оптимальной экстраполяции. Второй же алгоритм используется в случае, когда число наблюдений  $N \geq k + 1$ , поэтому он базируется на процедуре комплексирования метода оптимальной экстраполяции и ММГУА.

В обоих алгоритмах предусмотрена процедура внесения в экстраполированные значения метеорологических величин поправок на рельеф местности.

6. Подсистема объективного анализа трехмерной структуры мезометеорологических полей предназначена для определения вертикальных профилей метеорологических величин в узлах заданной мезомасштабной сетки по данным аэрологических наблюдений окружающих их станций. Процедура объективного анализа базируется на использовании ММГУА и метода оптимальной интерполяции, если узел регулярной сетки находится в области интерполяции, и оптимальной экстраполяции, – если вне области интерполяции.

7. Подсистема представления выходной информации предназначена для записи (в заданном формате) результатов проведенных расчетов и вывода их на экран, файл или на печать.

8. Интерфейс пользователя обеспечивает работу всех подсистем АРМ-геофизик. Запуск отдельной подсистемы осуществляется из программы интерфейса пользователя.

Интерфейс пользователя программно реализован в Windows приложении ARM.EXE и ориентирован на работу в операционной среде Windows 3.1. Для разработки Windows-приложения АРМ-геофизик использована система Delphi. В этой системе применяется язык программирования высокого уровня – Object Pascal, важным свойст-

вом которого является возможность вызывать внешние функции в стиле языка Си и подключать к Windows-приложению программы, написанные на любом из распространенных языков программирования (в нашем случае это язык Fortran, использованный для написания основных программ прогнозирования).

Первая версия АРМ-геофизик реализована на персональном компьютере PC/AT 386.DX с оперативной памятью 4 Мбайт при наличии накопителя на жестком диске со свободными 80 Мбайт.

## 5. Заключение

В настоящем обзоре обобщены лишь наиболее важные результаты метеорологических исследований, проведенных в ИОА СО РАН в период с 1980 по 1999 г. Однако спектр реализованных задач существенно шире. В частности, специалистами ЛФМ дополнительно:

- разработаны методические основы и алгоритмы численного прогноза характеристик атмосферно-оптического канала, базирующиеся на использовании метода группового учета аргументов и данных разложения вертикальных профилей метеорологических величин по ЕОС [33];
- предложена методология создания муниципальных и региональных геоинформационных систем мониторинга атмосферных загрязнений [34, 35];
- исследована пространственная статистическая структура поля общей облачности и проведена оценка вероятностей сохранения благоприятных и неблагоприятных облачных условий применительно к функционированию космических систем наблюдений [36, 37];
- проведен климатический анализ вертикальной структуры поля стратосферного озона над Западной Сибирью и предложен один из механизмов формирования его

межгодовой изменчивости, связанный с изменением от года к году атмосферной циркуляции [38, 39].

Дальнейшее развитие метеорологических исследований будет направлено на изучение динамики пограничного слоя атмосферы и временной изменчивости регионального климата Западной Сибири, на анализ пространственно-временной структуры мезометеорологических полей и, в частности, полей геопотенциала, температуры, влажности и ветра и т.п. Кроме того, большое внимание будет уделено дальнейшему развитию методов и алгоритмов численной оценки текущих и ожидаемых метеорологических условий на неосвоенных данными наблюдений территориях. Наконец, будут продолжены работы по созданию автоматизированных информационных систем, разрабатываемых с учетом геоинформационной технологии и новых методов прогнозирования высотных метеорологических полей.

1. Зув В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 264 с.
2. Zuev V.E., Komarov V.S. Statistical Models of the Temperature and Gaseous Components of the Atmosphere. Dordrecht; Boston; Lancaster, Tokyo: D.Reidel Publishing Company, 1987. 306 p.
3. Комаров В.С., Михайлов С.М., Ромашов Д.Н. Статистическая структура вертикального распределения атмосферного озона. Новосибирск: Наука, 1988. 77 с.
4. Комаров В.С., Мицель А.А. // Космические исследования. 1984. Т. XXII. Вып. 2. С. 306–309.
5. Zuev V.E., Komarov V.S. // Adv. Space Res. 1985. V. 5. № 6. P. 61–66.
6. Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Михайлов С.А. // Метеорология и гидрология. 1985. № 1. С. 56–61.
7. Зув В.Е., Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Михайлов С.А. // Доклады Академии наук СССР. 1985. Т. 280. № 5. С. 1086–1090.
8. Ипполитов И.И., Комаров В.С., Мицель А.А. // Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1985. С. 4–44.
9. Комаров В.С., Михайлов С.А. // Метеорология и гидрология. 1986. № 3. С. 44–50.
10. Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Михайлов С.А. Статистические и аналитические модели высотного распределения малых газовых составляющих земной атмосферы: Справочный материал. Томск, 1986. 29 с. (Препринт / Томский филиал СО АН СССР, № 12).
11. Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Михайлов С.А. // Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. С. 3–16.
12. Комаров В.С., Ременсон В.А. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 7. С. 3–15.
13. Комаров В.С. Статистика в приложении к задачам прикладной метеорологии. Томск.: Изд-во СО РАН, 1997. 255 с.
14. Комаров В.С., Ременсон В.А. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 5. С. 741–750.
15. Комаров В.С., Акселевич В.И., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 2. С. 231–237.
16. Комаров В.С., Акселевич В.И., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 2. С. 238–243.
17. Комаров В.С., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 7. С. 941–957.
18. Комаров В.С., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 7. С. 958–965.
19. Комаров В.С., Акселевич В.И., Гришин А.И., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 7. С. 1039–1047.
20. Комаров В.С., Креминский А.В., Ломакина Н.Я., Матвиенко Г.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 4. С. 413–423.
21. Комаров В.С., Креминский А.В., Ломакина Н.Я., Матвиенко Г.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 4. С. 541–546.
22. Zuev V.E., Komarov V.S., Kreminskii A.V. // Appl. Opt. 1997. V. 36. № 9. P. 1906–1914.
23. Комаров В.С., Креминский А.В., Попов Ю.Б. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 8. С. 808–819.
24. Komarov V.S., Grishin A.I., Kreminskii A.V., Matvienko G.G., Popov Yu.B. // Fifth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Proceedings of SPIE. 1998. V. 3583. P. 214–218.
25. Комаров В.С., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 8. С. 730–735.
26. Комаров В.С., Креминский А.В., Попов Ю.Б. // Метеорология и гидрология. 1999. № 8. С. 37–45.
27. Комаров В.С., Креминский А.В., Матвиенко Г.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 11–12. С. 1563–1571.
28. Комаров В.С., Креминский А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 4. С. 654–659.
29. Комаров В.С., Попов Ю.Б. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 8. С. 801–807.
30. Михайлов С.А. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 2. С. 265–273.
31. Комаров В.С., Креминский А.В., Ломакина Н.Я., Хащевский А.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 4–5. С. 553–568.
32. Комаров В.С., Креминский А.В., Синева К.Я. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 4. С. 484–488.
33. Комаров В.С., Калинин А.Н., Михайлов С.А. // Оптика атмосферы и океана. 1989. Т. 2. № 5. С. 513–520.
34. Комаров В.С. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 2. С. 119–131.
35. Зув В.Е., Комаров В.С., Калинин А.Н., Михайлов С.А. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 2. С. 132–145.
36. Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Ременсон В.А. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 1. С. 113–118.
37. Комаров В.С., Креминский А.В., Ломакина Н.Я., Воробьев В.И. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 1. С. 71–74.
38. Комаров В.С., Зув В.В. // Научная конференция «Актуальные вопросы геологии и географии Сибири», посвященная 120-летию основания Томского государственного университета: Тезисы докладов. Томск, 1998. Т. 4. С. 121–123.
39. Komarov V.S., Zuev V.V., Lomakina N.Ya., Marichev V.N., Popov Yu.B. // Fifth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Proceeding of SPIE. 1998. V. 3583. P. 514–519.

*V.E. Zuev and V.S. Komarov. Meteorological investigations at the Institute of Atmospheric Optics SB RAN from 1980 to 1999.*

The results of many-year meteorological investigations at the IOA SB RAN from 1980 to 1999 are presented. The problems of physical-statistical simulation of the atmosphere vertical structure and composition, spatial-temporal prediction of mesometeorological fields, and creation of databases and automated information systems are discussed.