

## **МЕТОДИКА ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ДЛЯ МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ**

*Аннотация.* На примере использования данных аэрологического зондирования в Якутии рассмотрена методика подготовки данных для малопараметрического представления вертикальных профилей температуры.

*Ключевые слова:* аэрологическое зондирование, вертикальные профили температуры, сплайн-интерполяция, ковариационная матрица, собственные числа и собственные вектора ковариационной матрицы, малопараметрическое представление вектора

Разложение рядов метеорологических величин на естественные ортогональные составляющие (ЕОС) можно рассматривать как одни из методов их модельного представления. Так, например, в работе [1] такой подход использовался для объективной классификации климатов и климатического районирования территории. Корреляционные матрицы вертикальных профилей метеорологических величин и рассчитанные на их основе ЕОС используются для реализации проекционного метода и метода статистической регуляризации при решении обратных задач атмосферной оптики [2].

В данной работе исследуются возможности малопараметрического представления вертикальных профилей температуры с использованием ЕОС их ковариационной матрицы, построенной по ансамблю таких профилей. Задача решается на примере вертикальных профилей температуры, полученных по данным аэрологического зондирования атмосферы в Якутии (станция Жиганск) за 2018 г.

В работе рассматривается методика подготовки данных для последующего разложения вертикальных профилей температуры воздуха по собственным векторам ковариационной матрицы [3].

Параметризация вектора  $g$  сводится к решению следующих задач:

- формирование ансамбля векторов  $r$ , статистические свойства которого были бы «близки» к тем векторам, для которых необходимо произвести параметризацию;
- расчет ковариационной матрицы для этого ансамбля;
- расчет собственных чисел и собственных векторов ковариационной матрицы;
- формирование матрицы  $M$ , состоящей из  $m$  первых собственных векторов ковариационной матрицы ансамбля векторов  $r$ ;
- для каждого подлежащего параметризации профиля  $r$  найти соответствующий ему вектор  $k$ .

В исходных данных аэрологического зондирования в качестве вертикальной сетки могут использоваться как высоты, на которых было произведено измерения температуры, так и давление для соответствующих высот. Однако при любом таком задании вертикальной сетки они оказываются не синхронизированы для данных любых случаев зондирований (рис. 1).

Поэтому для построения ковариационной матрицы была использована единая регулярная сетка, которая задавалась по давлению. Для пересчета исходных значений всех профилей ансамбля на одну и ту же сетку использовался метод сплайн-интерполяции. Первое значение сетки соответствовало давлению на уровне аэрологической станции, второе значение – 975 гПа, все остальные значения шли с шагом 25 гПа. Конечное значение давления задавалось как 100 гПа. Профили, не содержащие данные до высот с давлением 100 гПа, исключались из формируемого ансамбля (рис. 2.).

24343 Zhigansk Observations at 00Z 27 Jan 2018

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1009.0	92	-36.5	-39.3	75	0.13	350	4	236.0	236.4	236.1
1000.0	146	-34.9	-37.7	76	0.15	0	12	238.2	238.7	238.3
994.0	189	-34.0	-36.8	76	0.17	5	17	239.5	240.0	239.5
967.0	386	-30.1	-32.7	78	0.25	10	21	245.4	246.1	245.4
933.0	641	-25.0	-27.4	81	0.44	10	19	253.1	254.3	253.2
927.0	687	-24.1	-26.4	81	0.48	6	18	254.5	255.9	254.6
925.0	703	-24.1	-26.4	81	0.48	5	17	254.7	256.0	254.7

24343 Zhigansk Observations at 00Z 27 Mar 2018

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1000.0	-6									
988.0	92	-22.1	-26.3	69	0.46	340	10	251.9	253.2	252.0
980.0	150	-23.9	-28.9	63	0.36	343	11	250.7	251.7	250.8
945.0	406	-25.8	-30.7	63	0.32	355	16	251.4	252.3	251.4
932.0	503	-26.5	-31.4	63	0.30	349	14	251.7	252.5	251.7
925.0	556	-24.7	-29.0	67	0.38	345	14	254.1	255.1	254.1

Рис. 1 Иллюстрация не совпадения вертикальных сеток данных аэрологического зондирования как по давлению (первая колонка), так и по высоте (вторая колонка)

	A	B	C	D	E
1	1022	-33	1022	100	-73.3
2	1005	-33	975	125	-71.3
3	1000	-34	950	150	-69.7
4	991	-33	925	175	-64.1
5	947	-25	900	200	-58.5
6	925	-21	875	225	-58.9
7	918	-19	850	250	-63.9
8	888	-14	825	275	-61.0
9	850	-15	800	300	-58.7
10	787	-17	775	325	-56.0
11	764	-18	750	350	-53.4
12	700	-22	725	375	-49.7
13	690	-23	700	400	-45.5
14	642	-22	675	425	-41.8
15	615	-25	650	450	-38.5
16	592	-27	625	475	-35.5

Рис. 2. Пример проведения сплайн-интерполяции

На рис. 2 в таблице в колонках «А» и «В» по данным аэрологического зондирования содержатся значения атмосферного давления в гПа и температуры в градусах Цельсия. В колонке «С» записана новая регулярная сетка по давлению, на которую методом сплайн-интерполяции пересчитаны значения температуры. В колонках «D» и «E» – новая сетка по давлению (в порядке возрастания) и профиль температуры, подготовленный к включению в ансамбль профилей для расчета ковариационной матрицы. Фрагмент готового ансамбля представлен на рис. 3.

	A	B	C	D	E	F
1		1	2	3	4	5
2	100	-57.2	-50.3	-52.9	-53.2	-51.8
3	125	-55.7	-52.5	-52.8	-53.0	-48.9
4	150	-53.6	-50.4	-51.4	-51.5	-49.7
5	175	-52.3	-48.8	-51.7	-49.8	-49.1
6	200	-54.3	-49.7	-52.5	-51.3	-49.6
7	225	-59.2	-49.6	-53.9	-52.9	-51.4
8	250	-59.1	-50.6	-54.5	-54.4	-51.9
9	275	-61.8	-50.9	-58.8	-56.6	-54.4
10	300	-59.3	-50.2	-56.3	-57.3	-56.5
11	325	-57.3	-51.1	-53.6	-55.3	-54.6
12	350	-51.9	-50.4	-51.1	-51.4	-52.7
13	375	-48.3	-48.5	-48.3	-48.8	-49.9
14	400	-43.7	-47.8	-44.6	-46.1	-46.2
15	425	-39.4	-46.7	-41.5	-43.7	-44.3
16	450	-35.5	-45.5	-39.9	-41.6	-42.2

Рис. 3. Конечный этап формирования ансамбля вертикальных профилей температуры

Здесь в колонке «А» – профиль давления в гПа с шагом 25 гПа, все остальные колонки – вертикальные профили температуры, приведенные к единой вертикальной сетке. Первая строка содержит порядковый номер профиля температуры в ансамбле.

Расчет ковариационной матрицы производился с использованием стандартной опции «Ковариация» пакета «Анализ данных» табличного процессора «Excel». Результат такого расчета представлен на рис. 4 (поскольку ковариационная матрица является диагональной, то на рис. 4 представлена лишь ее часть ниже главной диагонали). Здесь первая колонка – профиль давления в гПа, первая строка – порядковый номер уровня давления: первый – 100 гПа, второй – 125 гПа и т.д. Начиная с колонки «В» и 2-ой строки представлены значения ковариационной матрицы.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		1	2	3	4	5	6	7	8
2	100	3.33204							
3	125	2.31419	2.82745						
4	150	2.28729	2.59706	3.6625					
5	175	2.32188	2.70083	3.49393	4.76108				
6	200	2.66574	3.08258	3.80521	4.81881	6.44229			
7	225	2.6838	3.4357	4.42176	6.49739	8.56859	15.8435		
8	250	2.26441	3.35995	4.92208	7.31144	9.70238	16.3532	21.1266	
9	275	1.67026	2.40531	3.75653	5.44096	6.94946	11.0176	14.5122	12.8401
10	300	1.25397	1.29444	2.10583	2.64125	3.50635	4.92014	6.63186	7.55732
11	325	0.77534	0.76754	0.7852	0.84032	1.59256	1.07723	1.73012	3.92142
12	350	0.20717	0.02881	-0.09935	-0.28639	0.03976	-1.14652	-1.3451	0.91365
13	375	0.36003	0.05242	-0.08492	-0.90551	-0.86603	-3.05844	-4.11418	-1.61194
14	400	0.09852	0.06387	-0.22542	-1.37112	-1.54631	-4.34232	-5.62477	-3.19111
15	425	-0.16911	-0.06625	-0.41965	-1.74374	-2.04701	-5.32423	-6.35772	-4.21714
16	450	-0.34408	-0.2867	-0.81444	-2.31601	-2.64275	-6.22422	-7.98095	-5.51922
17	475	-0.36079	-0.3736	-1.0453	-2.58471	-3.00728	-7.06336	-9.13174	-6.4759

Рис. 4. Пример представления ковариационной матрицы

Для вычисления собственных чисел и собственных векторов ковариационной матрицы использовалась специально подготовленная программа, в которой все действительные собственные числа и собственные вектора симметричной матрицы определяются методом скалярных произведений [4].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	№ =>	1	2	3	4	5	6	7	8
2	Собственные числа =>	402.4619	65.3631	39.8117	17.2886	12.6834	8.0096	7.2861	3.7459
3		Собственные вектора							
4	№ =>	1.0000	2.0000	3.0000	4.0000	5.0000	6.0000	7.0000	8.0000
5		-0.0059	0.0558	0.1251	-0.0215	0.2107	-0.0049	0.3731	0.0640
6	Размерность матрицы	-0.0181	0.0251	0.1361	-0.0661	0.2466	0.0451	0.2767	0.1455
7	37.0000	-0.0349	0.0242	0.1750	-0.1094	0.1724	-0.0103	0.3241	0.2179
8	Точность	-0.0616	0.0509	0.1774	-0.1031	0.2193	0.0185	0.2393	0.1401
9	0.0010	-0.0676	0.0867	0.2532	-0.1075	0.2560	0.0514	0.1117	-0.0413
10	Число итераций lmax	-0.1266	0.1859	0.3091	-0.2309	0.2285	0.1808	-0.2120	0.0239
11	1000.0000	-0.1656	0.2186	0.3446	-0.1740	0.1135	0.1206	-0.2756	-0.2261
12	Число собственных чисел	-0.1208	0.1234	0.3203	0.0354	0.0537	-0.3294	-0.2118	-0.0525
13	25.0000	-0.0558	0.0137	0.2889	0.3301	-0.0186	-0.3184	-0.0977	0.0451
14		-0.0062	-0.0619	0.2704	0.4045	-0.0447	-0.2051	-0.0739	0.1034
15		0.0225	-0.1097	0.2100	0.3544	-0.0497	-0.0302	-0.0721	0.0008

Рис. 5. Результат расчета собственных чисел и собственных векторов ковариационной матрицы вертикальных профилей температуры

На рисунке 5 представлен фрагмент файла с результатами расчета собственных чисел и собственных векторов ковариационной матрицы вертикальных профилей температуры. Здесь в колонке "А" приводятся поясняющие надписи, во второй строке приводятся значения собственных чисел ковариационной матрицы (ранжирование проведено в порядке их возрастания), а в колонках "В" и далее – профили собственных векторов ковариационной матрицы (шкала давления соответствует данным из колонки "А" на рис. 4).

На рис. 6 приведены графики первых 7 собственных векторов ковариационной матрицы вертикальных профилей температуры. Обращает на себя "поведение" первого (и самого информативного) собственного вектора. Он четко описывает типичное поведение вертикального профиля температуры: падение значений до уровня тропопаузы и рост после этого уровня.

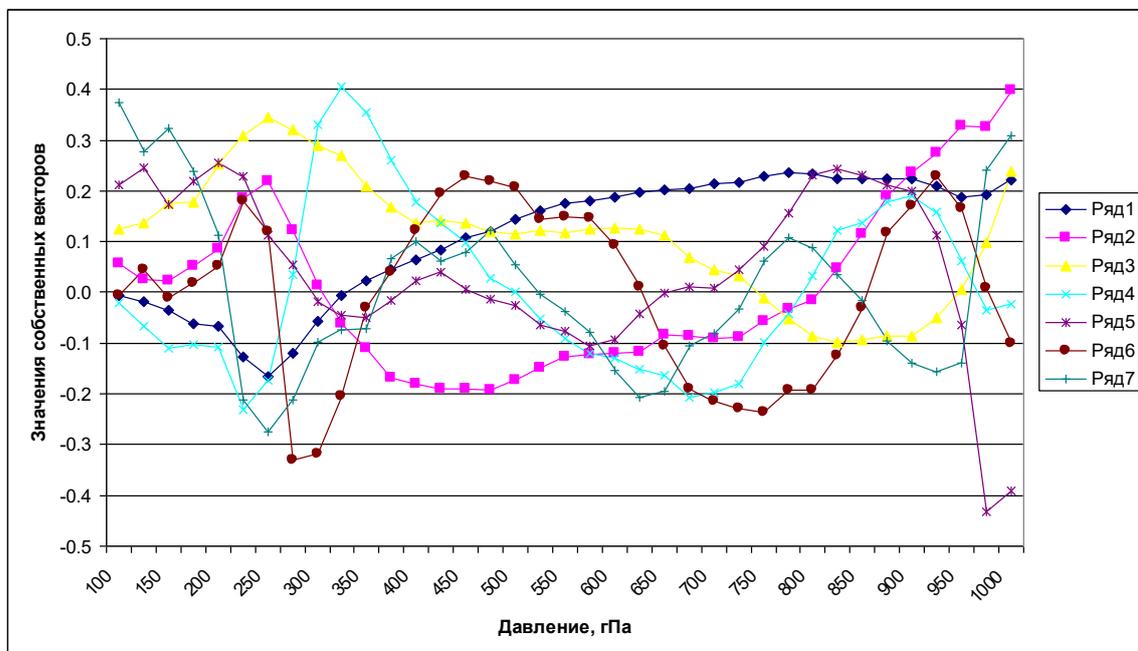


Рис. 6. График первых 7 собственных векторов ковариационной матрицы профилей температуры (номер ряда соответствует номеру собственного вектора, ранжированных в порядке убывания собственных чисел)

Расчет вектора  $\vec{k}$ , содержащий коэффициенты параметризации для подлежащего параметризации профиля  $\vec{r}$  производился с использованием метода наименьших квадратов по формуле (1).

$$\vec{k} = [M^T M]^{-1} M^T (\vec{r} - \bar{r}), \quad (1)$$

где матрица  $M$  состоит из  $m$  собственных векторов ковариационной матрицы ансамбля векторов температуры,  $M^T$  – транспонированная матрица,  $[ ]^{-1}$  – обратная матрица,  $\bar{r}$  – средний профиль ансамбля, использованного для расчета собственных чисел и собственных векторов ковариационной матрицы. С учетом полученного вектора с коэффициентами параметризации оценка исходного профиля может быть вычислена по формуле (2).

$$\hat{r} = M \vec{k} + \bar{r} \quad (2)$$

Сравнение вектора  $\vec{r}$  с его оценкой позволяет оценить погрешность малопараметрического представления профиля температуры (рис. 7). В результате сравнения средняя ошибка составила  $0,05 \text{ } ^\circ\text{C}$ , среднквадратическое отклонение  $1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

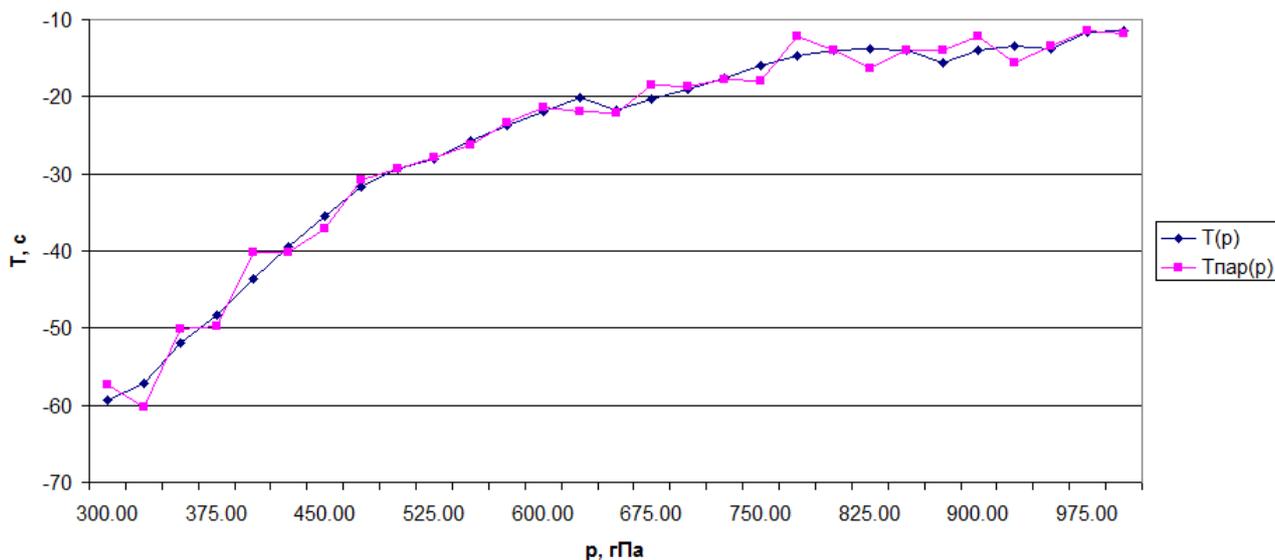


Рис. 7. График профиля температуры и его параметрического представления

*Список источников:*

1. Комаров В.С., Ломакина Н.Я. Статистические модели пограничного слоя атмосферы Западной Сибири – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2008 - 221 с.
2. Киселев В.Н., Кузнецов А.Д., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М. Математическое обеспечение автоматизированной обработки данных аэрологических наблюдений, выполненных с помощью зарубежных измерительных систем // Л., изд. ЛГМИ, 1089 – 106 с.
3. Кузнецов А.Д., Симакина Т.Е., Сероухова О.С. Сезонное малопараметрическое представление вертикальных профилей температуры в Якутии Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета. // СПб., РГМУ, 2020 – С. 172-174.
4. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭФМ. Справочник. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1987. - 240 с.