

## Метод выделения структур как способ увеличения связности региональных и глобальных полей температуры

В.А. Крутиков<sup>1</sup>, С.Г. Катаев<sup>2</sup>, В.А. Тартаковский<sup>1</sup>,  
А.И. Кусков<sup>1</sup>, Э.В. Иванова<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

<sup>2</sup>Томский педагогический университет  
634041, г. Томск, пр. Комсомольский, 75

Поступила в редакцию 3.10.2013 г.

Для исследования структуры и динамики полей температуры разного пространственного и временного масштаба был применен метод выделения структур и привлечены средние месячные температуры воздуха 249 станций на территории северной части Евразии за период 1955–2010 гг. Проведена классификация поля средней месячной температуры для каждого календарного месяца, получены структуры (классы). Построены поля средней температуры в годовом ходе. Выделены структуры с большими площадями, внутри которых формируются очаги воздушных масс различного происхождения. Уточнены очаги зарождения воздушных масс, однородные поля температуры и переходные контрастные зоны между ними.

*Ключевые слова:* температурное поле, разложение на составляющие, структура, связность; temperature field, the decomposition into components, structure, connectivity.

### Введение

Для решения глобальных проблем, стоящих перед человечеством, необходимо глубоко понимать процессы, происходящие на нашей планете. Построение реалистичных моделей, описывающих различные явления, происходящие в такой сложной системе, как наша планета, требует знания большого числа параметров. Именно поэтому в настоящее время проводятся многочисленные измерения в режиме мониторинга, что порождает стремительный рост объемов получаемых данных. Эти данные несут в себе достаточное количество скрытой информации, поскольку они, как правило, отражают совместное действие разнообразных влияющих факторов. Исследователи сталкиваются с серьезными трудностями, связанными, в частности, с отсутствием общепринятого подхода, который позволял бы получать скрытую информацию. Каждая сложная система требует своего набора методов исследования, зависящего от цели исследования, специфики рассматриваемой системы, ограничений различного рода, типа и объема имеющихся данных [1].

Основными факторами, формирующими температурные поля, являются радиация, подстилающая

поверхность и циркуляция атмосферы. Подстилающая поверхность является региональной особенностью, а циркуляция атмосферы имеет как глобальный, так и региональный характер. Это приводит к нарушениям однородности температурного поля, вследствие чего размеры областей локальной однородности уменьшаются, при этом увеличивается вклад микро- и мезометеорологических процессов, что изменяет структуру теплового поля [2–7].

В настоящей статье рассмотрены характеристики и динамика структур в годовом ходе над северной частью Евразии.

### Метод выделения структур

Метод выделения структур (МВС) получил свое развитие при изучении сложных систем различной природы в работах [8, 9].

Этот метод относится к классу кластерных, т.е. является процедурой, позволяющей либо провести разложение данных на структуры, либо обнаружить последние как заранее заданные. Структуры в данных наблюдений являются математическими. Они отражают совокупное проявление связей между переменными системы, которые не всегда очевидны и по этой причине часто являются скрытыми.

Метод МВС был применен для исследования структуры и динамики метеорологических полей разного пространственного и временного масштабов [10, 11].

\* Владимир Алексеевич Крутиков; Сергей Григорьевич Катаев (sgkataev@sibmail.com); Валерий Абрамович Тартаковский (trtk@list.ru); Аркадий Игнатьевич Кусков (arcus@rambler.ru); Элла Владимировна Иванова (ehllai@rambler.ru).

Используемый нами метод выделения структур можно описать следующим образом. Пусть имеется множество объектов  $a = \{a_1, a_2, \dots, a_M\}$ , каждый из которых характеризуется общей системой признаков  $X_\Omega = \{X, \Omega\}$ , где  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  — множество основных, а  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$  — множество вспомогательных или дополнительных признаков. Пусть  $D = \|d_{ij}\|_{M \times M}$  — матрица расстояний, построенная с использованием только элементов множества  $X$ . Можно сформулировать задачу отыскания на множестве  $a$  подмножеств (структур), удовлетворяющих определенному набору аксиом. Аксиомы структуры — это набор требований (ограничений), которые вытекают из цели исследования, и их можно разбить на 3 типа.

1. Тип  $A_D$ . Аксиомы, сформулированные в терминах только матрицы  $D$ .

2. Тип  $A_X$ . Аксиомы, являющиеся ограничениями, записанными через множество основных признаков  $X$ .

3. Тип  $A_\Omega$ . Аксиомы, определенные с помощью множества вспомогательных признаков.

В этих обозначениях возможный набор аксиом можно представить в виде упорядоченной тройки следующим образом:

$$A = \{A_\Omega, A_X, A_D\}.$$

Ясно, что в рамках такого представления можно выделить 8 классов аксиом в зависимости от присутствия того или иного типа аксиом:

$$\{0, 0, 0\}, \{0, 0, 1\}, \{0, 1, 0\}, \{1, 0, 0\}, \{0, 1, 1\}, \{1, 0, 1\}, \{1, 1, 0\}, \{1, 1, 1\}.$$

Символ 0 указывает на отсутствие и 1 на наличие в позиции кода типа аксиомы  $A_\Omega, A_X, A_D$ . Класс аксиом  $\{0, 0, 0\}$  соответствует случаю, когда каждое выделенное подмножество без всяких дополнительных условий объявляется структурой. Такие структуры будем называть «естественными». Класс аксиом  $\{0, 0, 1\}$  включает в себя дополнительные ограничения, сформулированные опять же с помощью понятия расстояния между объектами. Эти два варианта используют только расстояния между объектами, поэтому они соответствуют обычному иерархическому кластерному анализу с введением, возможно, дополнительных требований. Типичная аксиома из этого класса:

$$A_D = \{\max d_{ij} \leq d_0, (x_j, x_k) \in X_\alpha\},$$

где  $x_\alpha$  — множество объектов, фиксирует выделенные классы как структуры, если только максимальное расстояние между любой парой объектов не превышает заранее заданное число  $d_0$ . В этом случае форма кластеров будет близка к гиперсфере.

Аксиомы группы  $A_X$  могут включать в себя некоторые ограничения на функции от признаков  $X$ . Например, аксиома

$$A_X = \{R(X_\alpha) \geq R_0 \wedge D(X_\alpha) \leq D_0\}$$

требует, чтобы связность поля выделенного множества объектов  $R(X_\alpha)$  была не меньше заранее заданного значения  $R_0$ , а дисперсия  $D(X_\alpha)$  была не больше  $D_0$ .

Аксиомы группы  $A_\Omega$  формируются из дополнительных признаков, если таковые имеются. Примером подобных дополнительных признаков могут служить координаты метеостанций при анализе полей метеопараметров и т.д.

## Алгоритм метода выделения структур

Алгоритм выделения структур, используемый для решения этой задачи, наиболее просто может быть описан на языке теории графов.

Соотнесем с каждым объектом  $a_i, i = 1, \dots, N$  вершину  $x_i$  некоторого графа  $G = (X, E)$ , а каждому ребру  $e_{ij} = (x_i, x_j) \in E, i, j = 1, \dots, N$ , связывающему вершины  $x_i$  и  $x_j$ , в качестве стоимости  $c_{ij}$  припишем величину, равную расстоянию  $d_{ij}$  между соответствующими объектами в пространстве признаков:  $c_{ij} = d_{ij}$ . Выделение структур возможно в двух вариантах.

### Вариант 1

Начальное состояние — полный граф. Будем последовательно удалять из графа ребра  $e_{ij}$  со значениями, большими некоторого порога  $d_p^t$ , получая на каждом шаге  $G^t = (X^t, E^t)$  — граф на уровне  $t$ , множество ребер которого  $E^t = \{e_{ij} \in E : c_{ij} \leq d_p^t\}$ . Будем уменьшать величину  $d_p^t$ , и тогда, начиная с некоторого значения  $d_p^{t*}$ , исходный граф станет несвязным, появится  $k_t$  подграфов (компонент связности)  $G_1^t, G_2^t, \dots, G_{k_t}^t$  с различным числом вершин, среди которых могут быть подграфы, состоящие из одной вершины. Повторение процедуры дальнейшего уменьшения порогового значения  $d_p^t$  приводит к выделению все более связных подграфов.

### Вариант 2

Начальное состояние — граф без ребер. Будем последовательно добавлять в граф ребра  $e_{ij}$  со значениями меньше некоторого порога  $d_p^t$ , получая на каждом шаге  $G^t = (X^t, E^t)$  — граф на уровне  $t$ , множество ребер которого  $E^t = \{e_{ij} \in E : c_{ij} \leq d_p^t\}$ , состоящий из  $k_t$  компонент связности  $G_1^t, G_2^t, \dots, G_{k_t}^t$  с различным числом вершин. Будем увеличивать  $d_p^t$ . При этом число компонент связности и число изолированных вершин будут уменьшаться и, начиная с некоторого значения  $d_p^{t*}$ , исходный граф станет связным.

Назовем *структурой* множество вершин графа, образующее на некотором шаге  $t$  компоненту связности и удовлетворяющее при этом заранее заданным аксиомам структуры  $A = \{A_\Omega, A_X, A_D\}$ :

$$S = \{x : x = X_\alpha^t, G_\alpha^t = (X_\alpha^t, E_\alpha^t); c_\alpha^t \leq d_p^t, (A_\Omega, A_X, A_D)\}.$$

Если сформированная компонента связности удовлетворяет аксиомам структуры, то она объявляется структурой и фиксируется.

Каждую появляющуюся структуру можно охарактеризовать двумя пороговыми значениями:  $d : d_{\max}^k$  — значение порога, при котором этот подграф отделяется от остального графа, и  $d_{\min}^k$  — значение порога, при котором из этого подграфа выходит одна вершина или сразу несколько вершин, т.е. эта структура «разваливается». Таким образом, величина  $d_{\min}^k$  в какой-то степени определяет степень компактности  $k$ -го подграфа; чем меньше эта величина, тем сильнее связь между всеми элементами данного кластера. Значение  $d_{\max}^k$  для  $k$ -й структуры показывает, насколько она связана с остальной частью графа, а максимальная величина этого параметра  $D_{\max} = \max(d_{\max}^k)$ ,  $k = 1, N_d$ , т.е. значение порога, при котором из графа выделяется первый подграф, характеризует степень связности всего графа. По разности  $d_{\max}^k - d_{\min}^k$  можно судить о степени изолированности этой структуры от остальной части графа (своеобразное «время жизни» структуры).

Выбор метрики произволен, поскольку вряд ли существуют изначальные соображения о свойствах пространства изучаемых параметров. Исследования, проведенные нами, во всех случаях давали практически одинаковые результаты с использованием метрик Евклида и Хемминга.

В МВС, естественно, предусмотрена возможность для проведения полной классификации. Нередко встречаются ситуации, когда при выделении структур образовывались изолированные, т.е. не распределенные по классам, вершины, а решаемая задача не допускает этого. И тогда изолированные вершины присоединяются к ближайшей сформированной структуре.

Районирование территории с использованием временных рядов средней месячной температуры имеет своей основной целью нахождение естественных структур, т.е. районов, обладающих похожим поведением температуры. Привязка полученных таким образом структур-классов к ландшафту позволяет приблизиться к оценке причин формирования и выделения однородных зон.

Классификация дает возможность определять структуру рассматриваемого поля, выделяя пространственные области (классы) с близким характером эволюции. Если исходное поле разложить на составляющие, то, применяя к ним процедуру классификации, можно оценить пространственные области действия природного механизма, формирующего каждую составляющую.

В данном случае классификация поля средней месячной температуры преследует несколько целей. *Первая* — разбиение исследуемого пространства на отдельные непересекающиеся области дает возможность проводить анализ внутри каждого класса и изучать взаимодействия между классами. В частности, привязка классов к ландшафтам позволяет понять роль подстилающей поверхности при фор-

мировании климата. Эта задача решается с использованием представления исходных данных в виде матрицы  $X$ , в которой по строкам располагаются временные ряды (признаки), относящиеся к определенной станции.

*Вторая цель* — нахождение временных структур в метеоданных. Под временной структурой понимается период времени, в течение которого на всех пунктах наблюдения искомая величина изменялась примерно одинаково. В этом случае рассмотрение проводится с транспонированной матрицей. Теперь роль объектов играют определенные периоды времени, например для среднемесячных значений — это месяцы, а в качестве признаков выступают пункты наблюдения. Обнаружение таких временных структур является очень важным, поскольку границы выделенных временных интервалов указывают на моменты изменений климата и в зависимости от выбора исследуемой области можно говорить о региональном либо о глобальном изменениях.

*Третья цель* — разбиение объектов на классы позволяет вычислить статистические характеристики исследуемого признака или признаков для каждого кластера: среднее значение, дисперсия и т.д. Но, кроме этого, каждому кластеру можно приписать и определенные универсальные (структурные) характеристики, зависящие только от отношений (длин связи) между элементами: среднее значение длины связи, ее дисперсия, изолированность, компактность кластера и т.д. Это, безусловно, полезно, так как дает возможность количественно сравнивать различные кластеры друг с другом по этим структурным параметрам и оценивать все разбиение в целом, анализируя удаленность кластеров друг от друга.

## **Материалы исследования и обсуждение полученных результатов**

Для анализа были привлечены средние месячные температуры воздуха 249 станций на территории северной части Евразии за период 1955–2010 гг. (Climatic Research Unit, <http://www.metoffice.gov.uk>). Сеть станций — неравномерная: более плотная на юге и западе исследуемой территории и менее плотная в Сибири и на севере. Равномерность сети привлекаемых к исследованию станций можно учесть, применив метод полигонов, предложенный еще в 1911 г. Tissen [12].

Суть его заключается в следующем: через середины отрезков, соединяющих станции, проводят перпендикуляры, при пересечении которых образуются многоугольники, внутри каждого из которых заключена станция. При этом контур многоугольника является геометрическим местом, в котором точки внутри каждого полигона расположены наиболее близко к той станции, к которой относится данный полигон. Затем планометрированием определяют площади полученных полигонов как

в метрических (км<sup>2</sup>), так и в относительных ( $ai = si/s$ ) единицах, которые принято называть весами:  $si$  – площадь полигона, км<sup>2</sup>;  $s$  – площадь исследуемой территории, км<sup>2</sup>;  $ai$  – вес полигона.

Неравномерность расположения станций сети можно учесть, применив коэффициент вариации  $\alpha$ . Согласно [13, 14] для  $\alpha > 0,2$  сеть станций следует считать неравномерной. При умеренно неравномерной сети коэффициент вариации площади полигонов находится в пределах 0,2–0,5. При  $\alpha > 0,5$  сеть станций можно расценивать как сильно неравномерную.

Для станций, используемых в работе,  $\alpha$  составляет 0,8, что свидетельствует о сильной неравномерности в расположении станций.

Для определения площади полигонов взят метод сеток [15]. Вся исследуемая территория была покрыта квадратной сеткой с шагом 36 км, т.е. по оси  $X$  получилось 233 точки, а по оси  $Y$  137, всего – 33921 точка. Средняя протяженность стороны квадрата составляет 36 км. Наименьшее число точек, вошедших в полигон, равнялось пяти, а наибольшее – 916. При этом относительная площадь (до 100 точек на полигон) составляет 0,31%. Количество полигонов, для которых число точек, входящих в полигон, колеблется от 100 до 200, равняется 70. Максимальная площадь полигона, на который приходится 200 точек, составляет 0,62%. Число полигонов размером 200–300 единиц равно 17. Относительная площадь полигона, в которую входит 300 точек, занимает 0,93%.

Применяя МВС для каждого календарного месяца, мы получили структуры (классы) и для каждого класса рассчитали среднюю температуру и площадь, занимаемую классом, выраженную в относительных

единицах:  $s_i = n_i/N \cdot 100$ , где  $s_i$  – площадь класса в относительных единицах (%);  $n_i$  – количество точек, попавших в класс;  $N$  – общее число точек;  $i$  – номер класса.

Результаты классификации ранжировались по температуре таким образом, что в первый класс попадали территории с самыми высокими температурами, а в последний – с самыми низкими. Эта процедура позволила сравнивать классы (по крайней мере, первый и последний) между собой за различные месяцы и таким образом выявлять эволюцию температурного поля (рис. 1, цв. вклейка).

По температуре и номеру класса были построены поля, в которых указывались номера классов. Проводились изолинии, отделяющие один класс от другого, а также строилось поле изотерм по значениям температуры в каждом пункте.

Классификация исходного поля средней месячной температуры на примере января представлена в табл. 1, данные которой показывают, что межклассовые расстояния могут достигать двадцатикратного превышения внутриклассовых расстояний. Это свидетельствует о высоком качестве проведенной классификации.

Из совместного анализа табл. 1–3 и рис. 1 и 2 (цв. вклейки) можно проследить следующую закономерность для всех календарных месяцев года: небольшое количество классов занимает значительную территорию. По всей исследуемой территории с учетом ее значительных размеров отмечаются положительные температуры в зимне-осенний период времени, для трех летних месяцев июнь–август температура на всей территории больше 0 °С, значения минимальных температур изменяются от –46,2 до 2,6 °С.

Таблица 1

Характеристика классификации исходного поля средней месячной температуры в январе над северной частью Евразии

№ класса	$\bar{T}$ , °С	$\sigma^2$	$R_0$ , °С	Межклассовое расстояние																	N			
				№ класса																				
				2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		19	20	
1	–46,2	11,8	0,051	0,16	0,20	0,32	0,33	0,39	0,40	0,41	0,42	0,50	0,56	0,57	0,64	0,65	0,77	0,79	0,79	0,92	0,96	0,97	2	
2	–37,8	17,9	0,066		0,11	0,17	0,17	0,24	0,24	0,26	0,27	0,34	0,40	0,41	0,48	0,49	0,62	0,63	0,63	0,77	0,80	0,81	10	
3	–35,5	14,7	0,054			0,12	0,15	0,19	0,20	0,21	0,22	0,30	0,35	0,37	0,44	0,45	0,57	0,59	0,59	0,72	0,75	0,76	5	
4	–29,4	8,0	0,046				0,09	0,09	0,12	0,12	0,11	0,18	0,24	0,25	0,32	0,33	0,45	0,47	0,47	0,60	0,64	0,65	4	
5	–28,9	13,3	0,074					0,11	0,10	0,11	0,13	0,18	0,23	0,25	0,31	0,32	0,45	0,47	0,46	0,60	0,63	0,64	28	
6	–25,5	17,5	0,047						0,10	0,08	0,10	0,14	0,18	0,19	0,25	0,26	0,38	0,40	0,40	0,53	0,56	0,57	4	
7	–25,4	29,1	0,061							0,07	0,11	0,15	0,17	0,19	0,24	0,25	0,38	0,40	0,40	0,53	0,56	0,57	4	
8	–24,5	22,3	0,035								0,09	0,12	0,15	0,17	0,23	0,24	0,36	0,38	0,38	0,51	0,54	0,55	3	
9	–24,0	13,5	0,056									0,09	0,15	0,15	0,22	0,22	0,35	0,37	0,37	0,50	0,53	0,54	3	
10	–19,9	21,6	0,051										0,12	0,11	0,15	0,16	0,27	0,29	0,29	0,42	0,46	0,47	2	
11	–16,8	15,4	0,099												0,11	0,11	0,13	0,22	0,24	0,24	0,37	0,41	0,41	62
12	–16,3	16,3	0,042													0,09	0,08	0,20	0,22	0,23	0,35	0,39	0,39	2
13	–12,7	4,9	0,037														0,06	0,14	0,15	0,16	0,28	0,32	0,33	5
14	–12,3	10,4	0,033															0,13	0,15	0,17	0,28	0,31	0,32	2
15	–5,6	8,9	0,025																0,06	0,09	0,15	0,20	0,19	2
16	–4,7	12,5	0,052																	0,10	0,13	0,20	0,18	6
17	–4,0	10,6	0,106																		0,14	0,20	0,18	74
18	2,2	9,1	0,028																			0,14	0,8	6
19	4,2	56,9	0,078																				0,10	9
20	4,5	15,5	0,058																					2

Сопряженность выделенных классов в годовом ходе

№ класса	Месяц											
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
0	32,9	29,6	33,4	29,0	32,0	32,2	35,1	34,7	34,6	23,8	28,4	25,6
1	76,1	92,2	81,7	75,6	81,2	74,5	82	56,3	81,7	72,4	74,8	81,3
2	81,2	79,7	81	91,6	56,5	56,5	55,4	95,6	55,5	93,7	83,2	93,8
3	87	86,1	94,4	97,8	69	93,9	95	70,9	67,8	95,7	95,2	78,1
4	67,6	73,6	92,6	98,8	87,6	76,2	57	57,8	94,8	85,2	88,2	57,8
5	87,5	98,4	65,2	92,7	71,3	95,8	68,6	82,9	95,9	43,3	48,2	77,4
6	96,3	92,1	98,4	95,6	55	78,4	93	89,6	76,3	88,8	71	50,7
7	89,3	80	71,3	47,6	69,8	80,8	82,9	82,9	82,9	86,7	63,9	91,5
8	70,4	92,7	94,8	79,6	83,7	92,2	89,5	85,8	77,6	96,2	90,5	68,9
9	89,7	91,4	82,6	81,6	92,8	41,8	92	58	70	52	94,2	71,9
10	61,7	60	86,2	88,8	89,6	42,7	46,5	80,4	88,3	90,9	93,8	77,1
11	86,8	71,6	78,9	85,8	49,7	74,3	85,7	35,5	99	93,6	95	72,6
12	88,3	79,2	89,4	97,8	89,6	88,3	63	84	86,1	79,5	87,8	93
13	93,1	93,5	92,7	52	91,7	67,2	79	76,2	97,4	85,6	91,8	79,4
14	86,3	92,7	81	83	97,5	90,1	80,7	60,1	88,4	95,5	77	81,3
15	80,9	72,9	93,4	98,3	97	83,9	94,1	86,7	82,7	92,6	93,3	87
16	66,1	83,4	86	95,6	82,3	86,6	88,6	47,9	84	72,9	97,2	59
17	67,7	60,1	86,4	84	94,2	65	53,4	96,1	80,7	96,1	85,5	69
18	75,7	91	86,7	60,4	90,3	76,5	69,7	84,7	88,6	66,1	97	87,6
19	78,2	61,6	96,9	85,1	82,4	90,6	93,9	67,9	68,8	90,6	84,8	76
20	77,9	83,7	74,8	93,6	91,1	87,8	38,1	77,2	84,3	91,7	96,7	63,8
21		83,6	89,1	54	85,9	97,3	98,4	78,8	96,4	45,1	94,7	74
22			66,2		61,6	81,3	92,8	86,2	82,4	82	93,3	
23					86,4	91,8	84,1	85	84,5		54,1	
24					68,8	58,9	78,5	72,5	80,8		75	
25					83,6	84,1	57,4		83		86,2	
26					88,1	74,2			46,2		84,5	
27					81,4	85,8			87,4		93,9	
28					55,8	83,8			87		80	
29						62,7			95		82,8	
30									86,1		77,2	
31									63,3			
32									52,3			

Максимальные значения температуры по территории во все месяцы года положительны и изменяются от 4,3 до 31 °С (см. цв. вклейку рис. 1), конфигурация годового хода как положительных, так и отрицательных температур совпадает, однако имеются различия в скорости роста и падения значений температуры, минимальные температуры растут значительно быстрее, чем максимальные, но и их падение также происходит быстрее. Так, рост минимальных температур от января к августу составляет 43,5 °С, а рост максимальных температур от января к июлю составляет только 26,5 °С. Уменьшение температуры от августа к январю составляет 48,9 °С, а максимальные температуры от июля к январю уменьшаются на 26,7 °С. Это сказывается на разности между максимальной и минимальной температурами на исследуемой территории, от января к августу она (разность) уменьшается более чем в 2 раза – от 50,7 до 22 °С. Величина разности характеризует контрастность поля температуры: чем больше разность, тем сильнее степень контрастности. Наблюдается временной сдвиг между максимальными и минимальными температурами. Так, максимум температуры в годовом ходе приходится на июль, а минимум на август. Из этого следует, что минимальная температура растет в течение

7 мес, а падает в течение пяти. Это говорит о том, что исследуемая территория охлаждается быстрее, чем нагревается (см. цв. вклейку рис. 1).

Исследования показали, что выделяются структуры с большими площадями, внутри которых формируются очаги воздушных масс различного происхождения.

Так, например, в январе 4-й класс занимает и охватывает 16,8 % от всей территории, 10-й класс – 20,1%, а 16-й и 17-й классы в сумме занимают 14,2% территории. Практически одинаковые по площади и температуре территории охватывают 16-й и 17-й классы, поэтому было целесообразно их объединить. Объединенные 19-й и 20-й классы занимают 5,6% всей территории, на их площадях располагаются 12 станций с температурами –37,8 и 46,2 °С соответственно. Таким образом, четыре класса из 20 выделенных контролируют около 56,7% всей площади исследуемой территории.

Выделенные крупные структуры со стабильным нахождением воздушной массы можно условно принимать за очаги формирования воздушной массы. Наибольшие районы формирования воздушных масс разделены узкими зонами с большим градиентом температуры, которые принято называть климатическими фронтами.



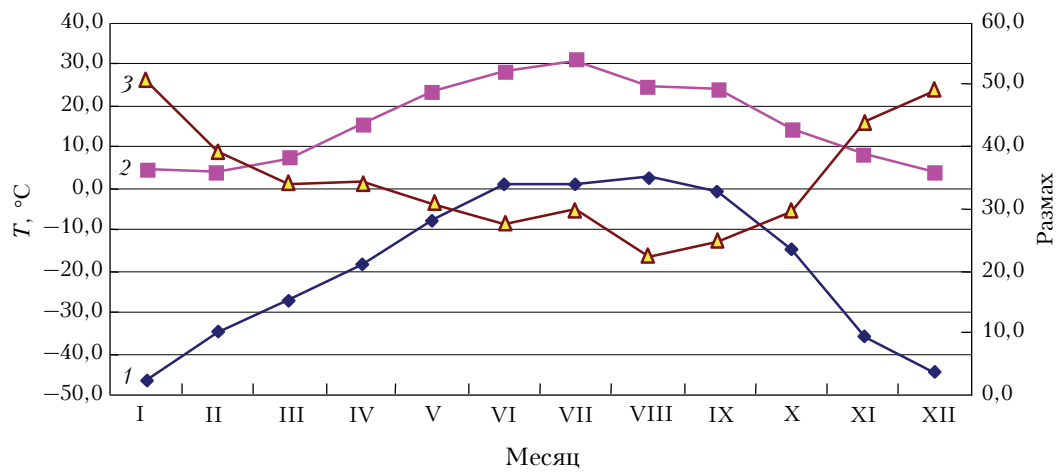


Рис. 1. Временная динамика минимальной (1) и максимальной (2) температур классов и их размах (3)

Так, Б.П. Алисов взял за основу важные циркуляционные признаки, интегрально характеризующие температурно-влажностное состояние климата определенного региона. Он использовал в качестве определяющего показателя преобладание тех или иных воздушных масс в различные сезоны, а границами климатов были взяты наиболее частые положения основных атмосферных (климатических) фронтов. Количественных характеристик для положения этих фронтов не существует, так что они проведены ориентировочно по синоптическому опыту [16].

Рис. 2 (цв. вклейка) позволяет установить место расположения основных воздушных масс, переходные зоны между ними и их характеристики. Для этого можно использовать МВС. Причем все это доступно исследователям, не имеющим синоптического опыта, но требует опыта проведения классификации, поэтому данный подход более объективен, чем тот, который использовал Б.П. Алисов.

Несмотря на то что классификация климатов была выполнена Б.П. Алисовым в середине XX в., она до сих пор не подвергается сомнениям, и его результаты приводятся другими авторами в настоящее время [17].

В качестве примера анализа полученных нами результатов рассмотрим термическое поле января (см. рис. 2, цв. вклейку). Выделяются три крупные воздушные массы (ВМ): территория, на которой располагается первая ВМ, совпадает с территорией 4-го класса, где средняя температура воздуха составляет  $-4^{\circ}\text{C}$  и охватывает европейскую территорию России и часть Востока Западной Европы; вторая ВМ охватывает территорию с 10-м классом с температурой  $-16,8^{\circ}\text{C}$  и располагается восточнее Уральского хребта над большей частью Западной Сибири и Северного Казахстана; третья ВМ занимает 19–20-е классы с температурой  $-37,8 \div -46,2^{\circ}\text{C}$  и расположена в районе Северо-Восточной Сибири и востока Средней Сибири. Переходная зона между 4-м и 10-м классом (т.е. между первой и второй ВМ) имеет ширину около 250 км, разность температур внутри этой зоны составляет  $10,7^{\circ}\text{C}$ . Внутри этой зоны располагаются пять классов, каждый со своими особенностями. При изучении только изотерм выделить внутри этой зоны пять структур не представляется возможным.

Были более детально уточнены очаги зарождения воздушных масс, однородные поля температуры и переходные контрастные зоны между ними.

В качестве характерного свойства воздушной массы выступает квазиоднородное поле температуры воздуха (небольшие горизонтальные градиенты), поэтому выделение структур можно сопоставить с выявлением территории, на которой зарождается воздушная масса. Для формирования очага воздушной массы требуются: однородные подстилающая поверхность и радиационный баланс, а также замкнутая циркуляция, которая не позволяет перемещаться воздушной массе с этой территории. В результате формируется однородное поле температуры, которое выделяется с МВС. Однако необходимо учитывать, что воздушная масса имеет горизонтальные размеры в тысячи километров, поэтому

структуры, охватывающие небольшие площади, следует относить к региональным очагам формирования, для которых местные условия оказывают значительное влияние, или эти структуры находятся в зоне, разделяющей основные воздушные массы, которые принято называть фронтами, в данном случае — климатическими. Климатические переходные зоны называть фронтами неверно, поскольку фронты, которые выделяются на картах погоды, исчезающе малы. Климатические переходные зоны имеют ширину несколько сотен километров и под понятие фронтов не подходят.

Так, в январе резкие переходы от одного класса в другой географически определены. Например, переход от 4-го к 10-му классу в европейской части территории практически меридиональный и направлен на юг. Зона раздела в западной части территории направлена вдоль Уральского хребта. После  $50^{\circ}$  с.ш. зона раздела разворачивается на юг к востоку и располагается вдоль гор юга Сибири, затем вдоль Амурской области и Дальнего Востока продвигается на север территории. При ширине фронтальной зоны 250 км и переходе от 4-го к 10-му классу перепад температур составляет  $12,8^{\circ}\text{C}$ . Вторая зона раздела расположена между бассейнами рек Оби и Енисея, замыкая внутри себя выделенный очаг холода (см. рис. 2, цв. вклейку). Наиболее контрастна эта зона над Забайкальем, Амурской областью и простирается вдоль побережья морей Тихого океана. При переходе от 10-го к 16-му классу перепад температур составляет  $12^{\circ}\text{C}$ . Третья зона перехода от 16-го к 19-му классу имеет контрастность в  $9^{\circ}\text{C}$  и огибает территорию северо-востока Сибири. Так, в январе, над континентом Евразии наблюдается очаг холода в районе Оймякона и Верхоянска, который совпадает с очагом формирования полярной континентальной воздушной массы в зимний период. Выделенный очаг холода образуется над зоной тайги и тундры Западно-Сибирской равнины.

К марту уменьшаются контрасты, увеличиваются территории, занимаемая ранее 4-м, а теперь 5-м классом, и площадь 1-го класса. Здесь центр холода, который составляет  $-25 \div -30^{\circ}\text{C}$ , перемещается в зону моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря.

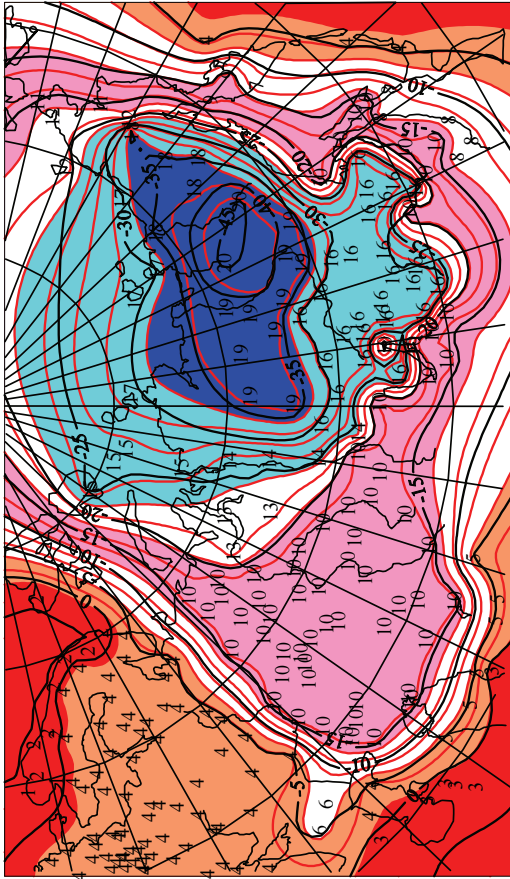
В апреле выделяются четко два класса с наибольшими площадями: 7-й класс — территория, занимаемая ранее 5-м классом; 13-й класс — территория гор на юге Сибири, Центральная Сибирь и к востоку охватывает Камчатский полуостров. Очаг холода увеличивается и занимает территорию морей Северного Ледовитого океана, кроме Баренцева моря.

В мае распределение классов приобретает зональный характер с ярко выраженной зоной перехода от 11-го к 27-му классу с перепадом температур в  $13,8^{\circ}\text{C}$  при размахе температуры на всей исследуемой территории  $31^{\circ}\text{C}$ .

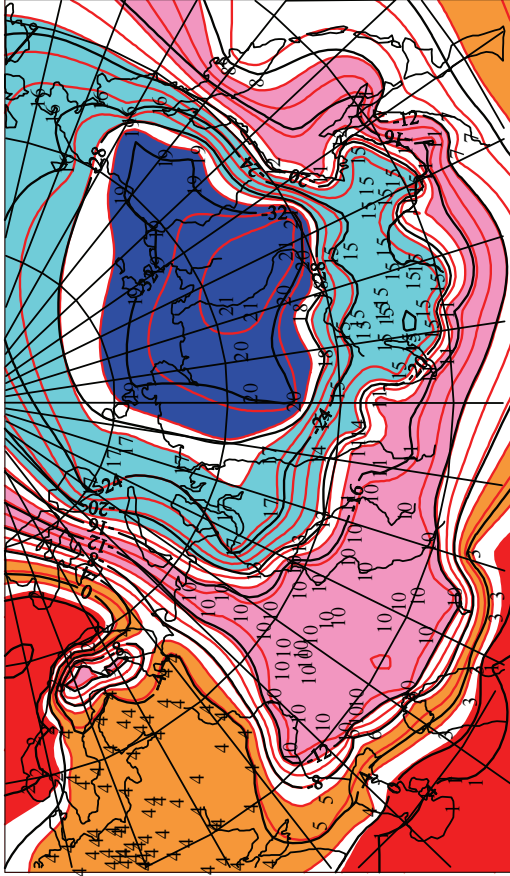
В июне конфигурация майского поля в целом сохраняется с переходом 11-го в 10-й класс, при этом температура над Прибайкальем, Забайкальем и югом Средней Сибири приблизительно выравнивается с Западной Европой (9-й класс) и составляет  $15,1-16,2^{\circ}\text{C}$ .



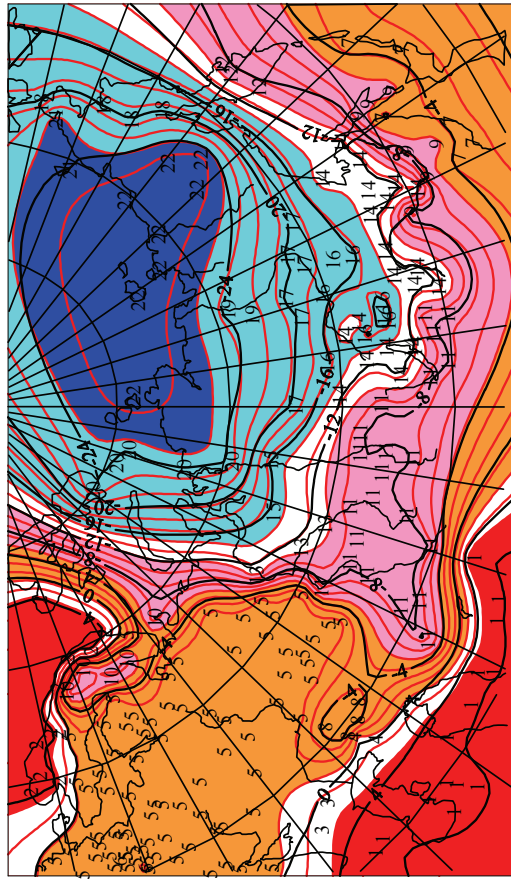
Январь



Февраль



Март



Апрель

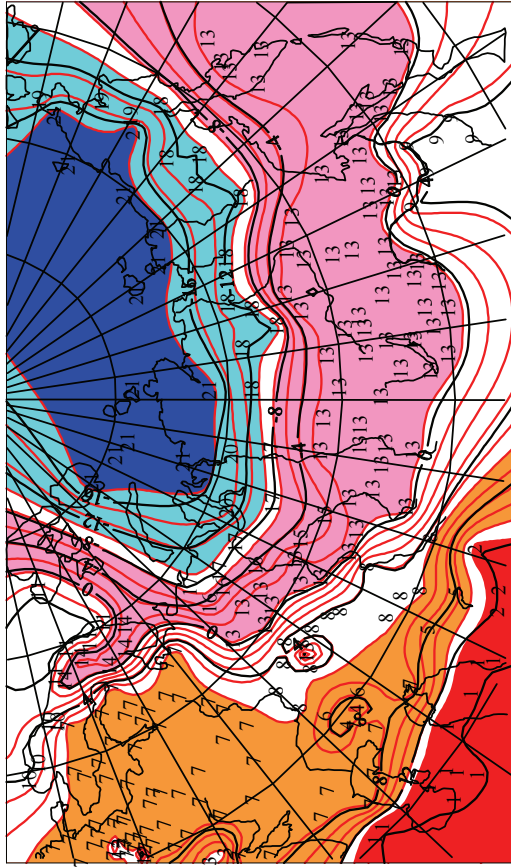
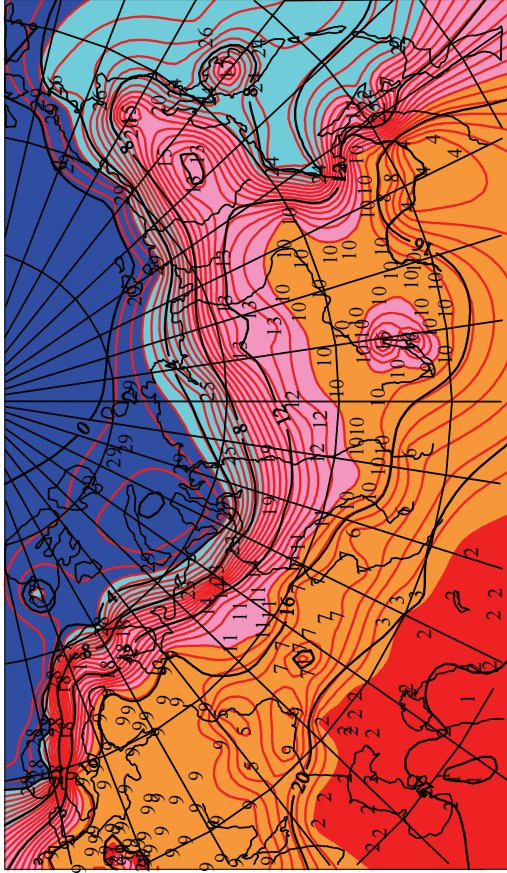


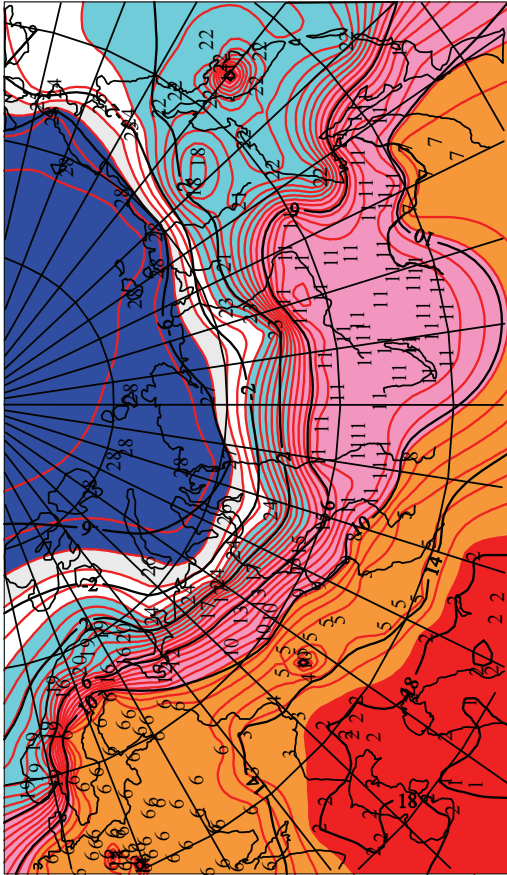
Рис. 2. Пространственная структура классов и средней температуры в годовом ходе



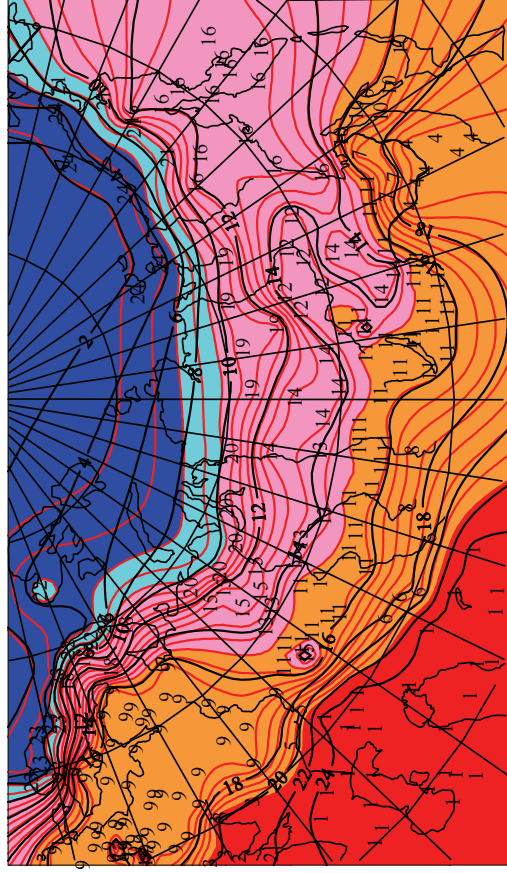
Июнь



Май



Август



Июль

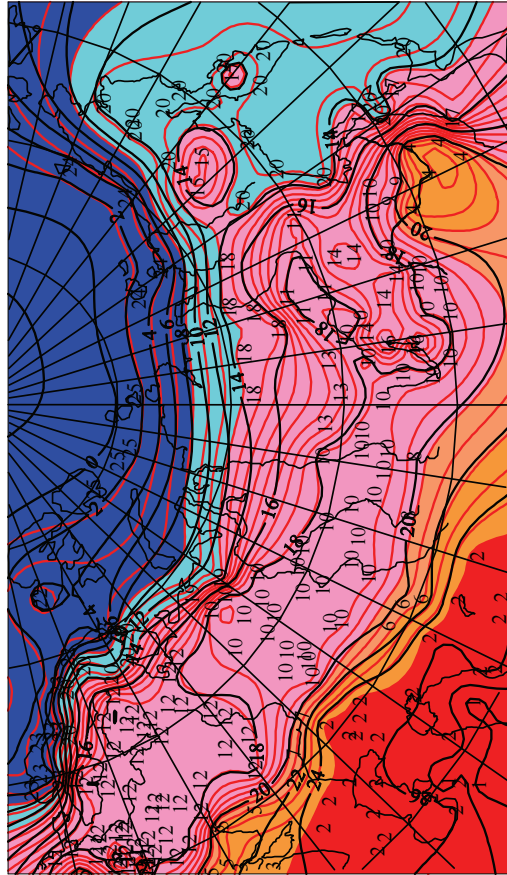
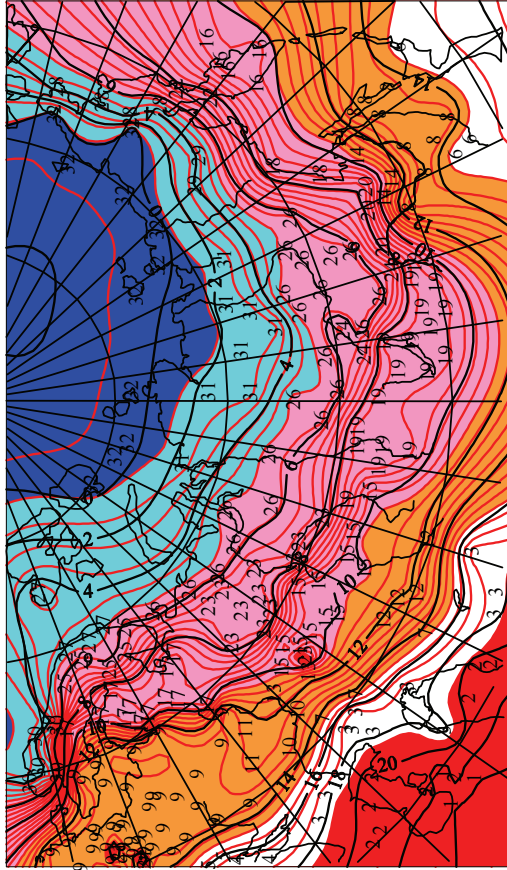


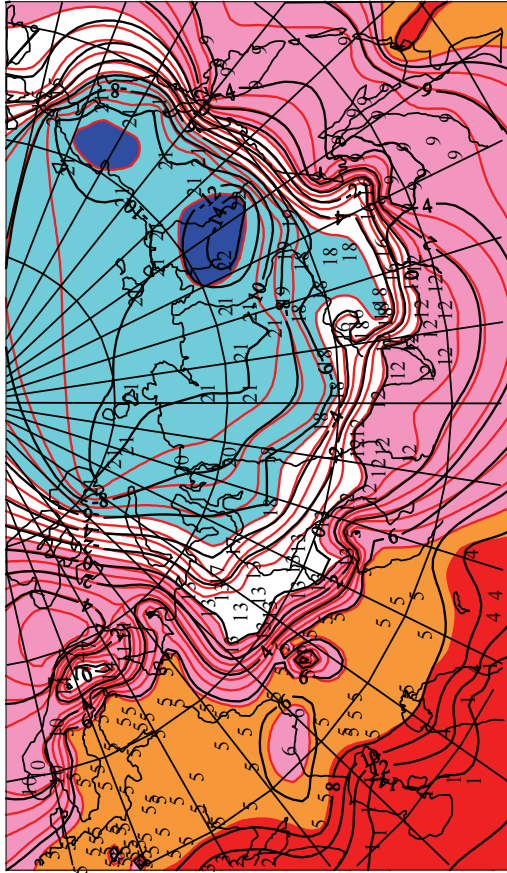
Рис. 2. Продолжение



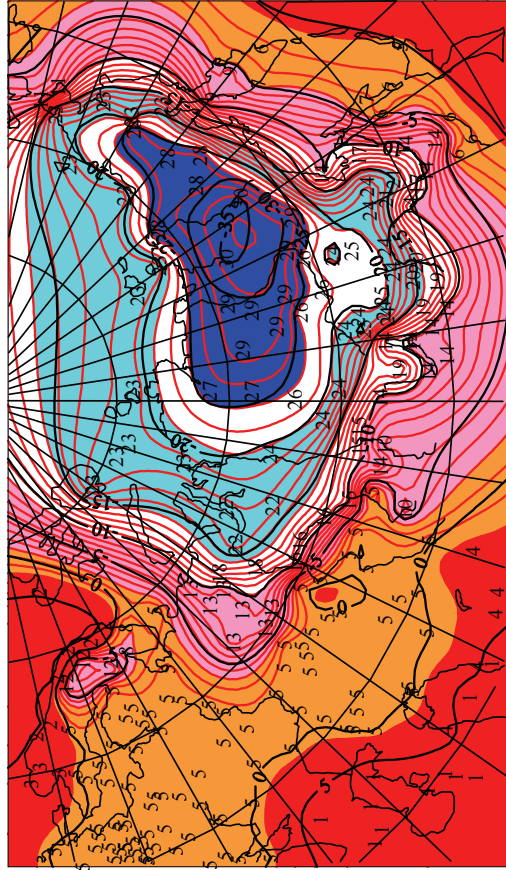
Сентябрь



Октябрь



Ноябрь



Декабрь

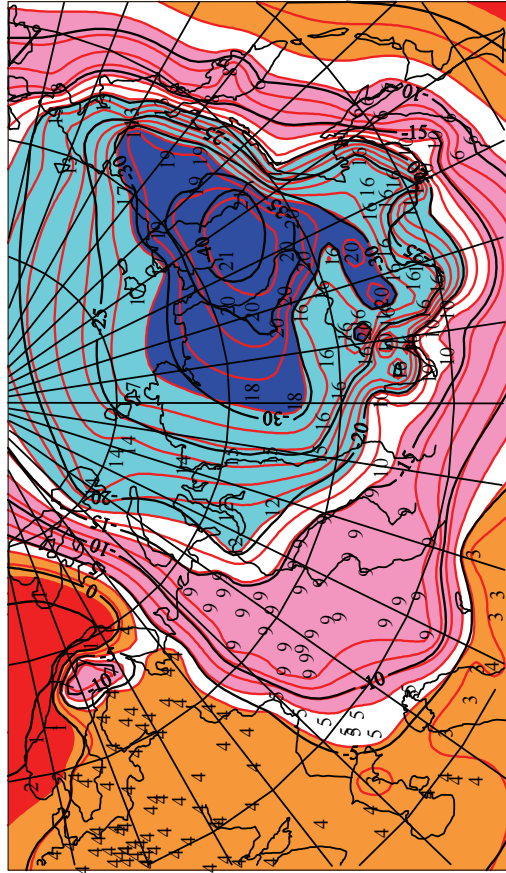


Рис. 2. Окогчанге

В июле классы имеют зональное распределение. Максимальные площади отмечаются в районах Каспийского и Аральского морей и охватывают 12% исследуемой территории. Расположенный над западными районами России и восточными районами Европы 12-й класс занимает 9% от всей площади, а 10-й класс, расположенный вдоль 60° с.ш., имеет протяжение с запада на восток от Урала до Амурской области. Характерной особенностью июля является выделение двух ярко выраженных контрастных зон на Севере Евразии и вдоль 50° с.ш. Наибольшие контрасты отмечаются в районах Швеции и Норвегии.

В августе картина практически не отличается от картины в июле.

В сентябре уменьшаются зоны тепла в районе Каспийского моря, увеличивается очаг холода с перемещением с Северного Ледовитого океана на континент.

В октябре классы начинают приобретать меридиональную направленность, формируется практически замкнутый очаг холода на северо-востоке Евразии.

В ноябре контрасты увеличиваются, центр холода передвигается в район Оймякона–Верхоянска, формируется практически одна, но очень интенсивная контрастная зона, которая оконтуривает очаг холода с перепадами температур почти в 27 °С.

В декабре начинают формироваться две фронтальные зоны, как и в январе.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что климатические воздушные массы совпадают с территориями наиболее обширных классов, а климатические фронты определяются как переходные зоны между ними.

Другой характеристикой классов является сопряженность, которая для каждого пункта, попавшего в класс, определяется теснотой связи. Сопряженность выражается через коэффициент корреляции, который характеризуется некоторым временным ходом, отражающим общее поведение поля температуры во временном ходе. Значения сопряженности выделенных классов отличаются в зависимости от соотношения вклада первой и второй компоненты в формирование ряда на конкретной станции. Характеристика (см. табл. 2) приведена только в соответствии с первой компонентой.

Использованный нами метод выделения структур позволил по-новому взглянуть на проблему выделения климатических воздушных масс и фронтов, упростить их выделение и более объективно обосновывать их географическое положение.

*V.A. Krutikov, S.G. Kataev, V.A. Tartakovsky, A.I. Kuskov, E.V. Ivanova. Method of allocation of structures as means of increasing connectivity of regional and global temperature fields.*

In this paper to investigate the structure and dynamics of temperature fields of the different spatial and temporal scale, the structure selection methods was applied. For the study, the monthly mean air temperature of 249 stations in northern Eurasia during the period 1955–2010 were involved. The fields of the average monthly temperature for each calendar month were classified. The average temperature in the annual behaviour have been built. The study revealed that structures with large areas are allocated, within which formed pockets of air masses of different origin are formed. Centers of origin of air masses, uniform temperature field and contrasting transitional zone between them are refined.

1. Дроздов О.А. О принципах рационализации сети метеорологических станций // Тр. ГГО. 1961. Вып. 123. С. 33–46.
2. Дроздов О.А., Шепелевский А.А. Теория интерполяции в стохастическом поле метеорологических элементов и ее применение к вопросам метеорологических карт и рационализации сети // Тр. НИУ ГУГМС. 1946. Сер. 1. Вып. 13. С. 65–115.
3. Гандин Л.С., Каган Р.Л., Тараканова В.П. К вопросу о рациональном планировании сети наблюдений за температурой воздуха // Тр. ГГО. 1968. Вып. 228. С. 30–40.
4. Меццерская А.В. К учету нестационарности температуры в статистических разработках // Применение статистических методов в метеорологии. Л.: Гидрометеониздат, 1971. С. 164–170.
5. Желтая Н.Н. О пространственной изменчивости средней декадной температуры воздуха в теплый период года // Тр. ГМЦ. 1971. Вып. 85. С. 47–56.
6. Лугина К.М., Мелашенко Л.Я. Пространственная корреляция аномалий температуры воздуха и использование ее при рационализации сети станций // Тр. ГГО. 1972. Вып. 286. С. 26–38.
7. Лугина К.М., Тараканова В.П. Пространственная структура поля средней месячной температуры // Исследование статистической структуры метеорологических полей. Т. 1. М.: Гидрометеониздат, 1975. С. 73–79.
8. Катаев С.Г., Катаев М.Ю. Математический формализм и алгоритм структурирования многомерных данных // Ползуновский вестн. 2012. № 2/1. С. 99–103.
9. Катаев С.Г., Катаев М.Ю. Математический метод и алгоритм сжатия многомерных временных рядов // Докл. ТУСУР. 2012. Т. 1(25). Ч. 2. Томск: ООО «Изд-во В-Спектр». С. 208–2013.
10. Крутиков В.А., Тартаковский В.А., Кусков А.И., Иванова Э.В. О связности региональных и глобальных полей температуры над азиатской территорией России // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 2. С. 117–121.
11. Крутиков В.А., Кусков А.И., Тартаковский В.А., Иванова Э.В. Основные статистические характеристики теплового поля температуры в приземном слое атмосферы над территориями России и сопредельных государств // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 2. С. 108–112.
12. Tissen A.H. Precipitation averages for large areas // Month. Weat. Rev. 1911. V. 39, N 7. P. 1082–1084.
13. Каган Р.Л. О редукции метеорологических элементов по площади // Применение статистических методов в метеорологии. Л.: Гидрометеониздат, 1966. С. 22–34.
14. Каган Р.Л. Осреднение метеорологических полей. Л.: Гидрометеониздат, 1979. 214 с.
15. Akin J.E. Calculation of mean areal depth of precipitation // J. Hydrol. 1971. V. 12, N 4. P. 363–368.
16. Алисов Б.П. Климат СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1956. 125 с.
17. Любушкина С.Г. Общее землеведение: Уч. пособие для студентов вузов, обучающихся по спец. «География» / С.Г. Любушкина, К.В. Пашканг, А.В. Чернов; Под ред. А.В. Чернова. М.: Просвещение, 2004. 288 с.