

## Глава 5. УПРАВЛЕНИЕ ЗЕМЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ

### 5.1. Картографирование агроклиматических характеристик

Существует определенный опыт разработки карт различных физико-географических характеристик, представляющих собой непрерывные функции, выведенные по результатам наблюдений в дискретных контрольных точках. В качестве таких точек используются метеопункты, где ведутся наблюдения за картографируемыми характеристиками. Однако по ряду характеристик, таких как радиационный баланс, турбулентный теплообмен и другие, имеется лишь несколько точек наблюдений не только на территории Полесья, но и на всей Беларуси. В этих случаях качество географических карт всецело зависит от субъективных оценок исследователя, и на первый план выступает проблема обоснования рациональной схемы распределения расчетных точек по исследуемой территории.

Требование к репрезентативному расположению точек с информацией – важное условие, необходимое при выполнении многих видов анализов, в частности, анализа поверхностей тренда. Достоверность карты находится в прямой зависимости от плотности и равномерности расположения точек с информацией. Критерии, применяемые для определения равномерности, не представляют большой сложности в практическом использовании.

Первоначальным этапом в картографировании агроклиматических характеристик является предварительная обработка данных наблюдений с оптимизацией расположения опорных точек, их количества и качества. Инструментом картографирования на настоящем этапе может выступать пакет SURFER. Основным назначением SURFER является обработка и визуализация двумерных наборов данных, описываемых функцией  $z = f(x, y)$ . Логику работы с пакетом можно представить в виде трех основных функциональных блоков: а) построение цифровой модели поверхности; б) вспомогательные операции с цифровыми моделями поверхности; в) визуализация поверхности. С учетом того, что пакет SURFER использует прямоугольные координаты пунктов наблюдений, необходим их пересчет из полярных (градусы).

В связи с этим решается прямая геодезическая задача Гаусса – Крюгера. Наиболее рациональной, на наш взгляд, является методика Д. А. Ларина, которая позволяет преобразовать координаты с достаточной для практических расчетов точностью. Широта ( $x$ ) и долгота ( $y$ ) рассчитываются по формулам

$$x = X + a_2 l^2 + a_4 l^4 + a_6 l^6 + \dots, \quad (5.1)$$

$$y = b_1 l + b_3 l^3 + b_5 l^5 + \dots, \quad (5.2)$$

где  $X$  – длина дуги от экватора до параллели с широтой ( $B$ ), рассчитываемая по формуле

$$X = \int_0^B a \, dB \quad (5.3)$$

или

$$X = a \frac{B'}{\rho} \left( 1 + \frac{e^2}{8} \frac{B'}{\rho} \cos B \right), \quad (5.4)$$

где  $\rho = \frac{180^\circ}{\pi}$ , а  $B' = B_2 - B_1$ , где  $B_1$  – широта, принятая за начало координат;  $a, b$  – коэффициенты, определяемые формулами

$$a_2 = \frac{1}{2} N \cos B \sin B, \quad (5.5)$$

где  $N = \frac{a}{W}$  – радиус кривизны первого вертикала, а  $W = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}$ ;  $e^2 = 0,0066934216$ ;  $a = 6378245,000$  м – большая полуось.

$$a_4 = \frac{1}{24} N \cos^3 B \sin B (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4), \quad (5.6)$$

где  $t = \operatorname{tg} B$  – сближения меридианов;  $\eta^2 = e'^2 \cos^2 B$ , а  $e'^2 = 0,0067385254$ .

$$a_6 = \frac{1}{720} N \cos^5 B \sin B (61 - 58t^2 + t^4), \quad (5.7)$$

$$b_1 = n \cos B, \quad (5.8)$$

$$b_3 = \frac{1}{6} N \cos^3 B (1 - t^2 + \eta^2), \quad (5.9)$$

$$b_5 = \frac{1}{120} N \cos^5 B (5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58\eta^2 t^2), \quad (5.10)$$

$$l = L_0 - L, \quad (5.11)$$

где  $L_0$  – долгота осевого меридиана (кратная  $6^\circ$ , начиная от  $3^\circ$ );  $L$  – долгота.

Преобразование координат вручную – достаточно тяжелая техническая задача, поэтому целесообразна разработка прикладной специализированной программы, позволяющей выполнить необходимые преобразования в автоматизированном режиме.

Одна из распространенных задач в картографировании заключается в изучении способа распределения точек на двумерной поверхности или карте. Эти точки могут соответствовать местам взятия проб, получения наблюдений или быть точками проекции. Задача может состоять в изучении однородности распределения точек наблюдения, плотности распределения или в изучении связи точек друг с другом. Все эти вопросы возникают у исследователей, а полевые наблюдения, связанные с анализом положения точек, всегда приводят к этим или сходным задачам. Разработанная методология применима непосредственно при изучении природных явлений.

Существующие схемы расположения точек на картах удобно разделить на три категории: равномерные, случайные и групповые. Конечно, для большинства карт характерны схемы распределения точек, занимающих промежуточное положение между перечисленными крайними типами, и обычно задача заключается в классификационном отнесении наблюдаемой схемы к одному из этих типов.

Оптимальное количество опорных точек должно обосновываться особо для каждой картографируемой характеристики. В случае недостатка точек опорной сети в обобщениях необходимо учитывать факторы климатообразования и косвенные физико-географические признаки путем введения функции распределения исследуемой характеристики [582]

$$M_{ij} = f(\varphi_j, \lambda_j, H_j), \quad (5.12)$$

где  $M_{ij}$  – величина физико-географической характеристики в ( $j$ )-точке, за ( $i$ )-период;  $\varphi_j, \lambda_j$  – соответственно географическая широта и долгота метеопункта;  $H_j$  – абсолютная отметка высоты точки.

Оптимизация контрольных точек основана на минимизации ошибок, получаемых в результате построения тех или иных карт. Карта, построенная при недостатке данных, дает лишь обобщенное изображение изолиний.

Оценку репрезентативности пространственного расположения точек наблюдений можно выполнить с помощью критерия ( $\chi^2$ ). При этом исследуемая территория делится на определенное количество исследуемых участков, содержащих контрольные точки. Размеры участков определяются исходя из предпосылки объединения исследуемых характеристик в пространственно-временные поля, аппроксимируемые пространственными корреляционными функциями. Внутри выделенных участков (областей) оценки репрезентативности осуществляются обычно при допущении, что оптимальным расстоянием (шагом) между метеопунктами является 20 километров. При существующей плотности метеорологической сети на локальных территориях (20 x 20 км) вообще могут отсутствовать метеопункты. Исходя из этого в качестве границ областей могут использоваться границы полей изокорреляций исследуемых характеристик.

Критерий ( $\chi^2$ ) теоретически не зависит от формы и ориентирования в пространстве областей. Если существующие метеопункты расположены равномерно по территории, то каждая выделенная область будет содержать равное количество точек. Критерий ( $\chi^2$ ) определяется как [62]

$$\chi^2 = \sum_{s=1}^n \frac{(N_s - X)^2}{X}. \quad (5.13)$$

где  $N_s$  – имеющееся число точек в ( $s$ )-области.

Полученные значения ( $\chi^2$ ) сравнивают с критическими и делают соответствующие выводы о репрезентативности пространственного расположения точек наблюдений. Заметим, что этот вывод касается только однородности распределения точек по участкам определенного размера. Вполне возможно, что существует такой вариант размера квадрата (особенно если он меньше, чем выбранный), при котором гипотеза о равномерности будет отклонена.

Например, для построения карт изогийет атмосферных осадков нами использованы 124 точки наблюдений ( $N$ ), наиболее надежные как источники информации, распределенные практически рав-

номерно по территории Беларуси. Для проверки репрезентативности используемой опорной сети территория Беларуси разделена на 14 равных прямоугольных участков (n) (рис. 5.1) [60]. В качестве границ областей используются границы полей изокоррелят атмосферных осадков (при  $r = 0,8$ ) площадью около 20 тыс. км<sup>2</sup> (прямоугольник – 160×120 км) с ожидаемым числом точек –  $X = N/n$  (около 9).

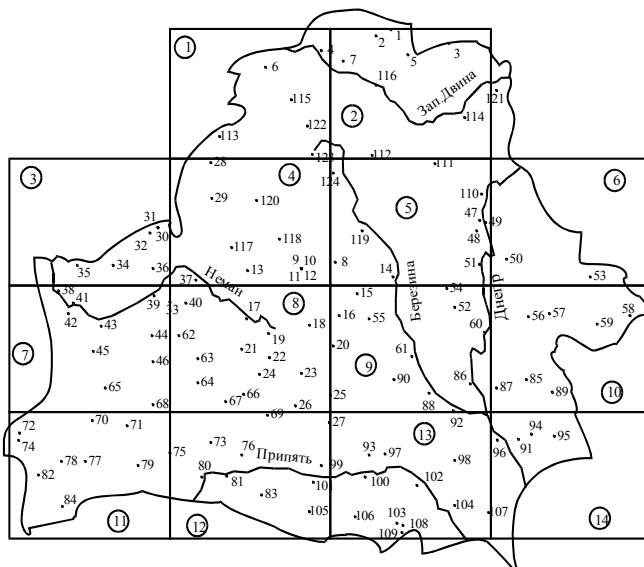


Рисунок 5.1 – Схема расположения контрольных точек наблюдений за атмосферными осадками на территории Беларуси

В таблице 5.1 представлены результаты расчетов ( $\chi^2$ ) по выделенным областям.

Таблица 5.1 – К определению критерия ( $\chi^2$ )

№ области	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	$\Sigma$
$N_i$ , штук	6	9	6	11	10	2	11	14	13	7	10	10	11	4	124
$\chi^2$	1,00	0,00	1,00	0,44	0,11	5,44	0,44	2,78	1,78	0,44	0,11	0,11	0,44	2,78	16,87

При числе степеней свободы ( $\nu = n - 2$ ), равном 12, для 5%-ного уровня значимости критическое значение статистики ( $\chi^2_{кр}$ ) равно 21,03 (больше полученного  $\chi^2 = 16,87$ , табл. 5.1). В этом случае можно говорить о незначительном отклонении распределения выбранных точек от равномерного.

Выбор рационального способа картографического отображения агроклиматических характеристик должен основываться на следующих факторах: особенности объекта (явления), его размещения, структуры; задачи картографирования объекта при создании карты; содержание и вид исходной информации, методов ее обработки и возможностей локализации этой информации на основе карт и по другим материалам. При выборе способа картографического отображения также учитывают общие закономерности пространственного размещения явлений (объектов) и типов их пространственно-территориальных структур.

Наиболее широко известны способы картографического отображения: значков, линейных знаков, ареалов, качественного фона, изолиний, картодиаграммы, картограммы, точечный способ [539].

*Способ значков* предпочтительно применять для отображения явлений в дискретных точках. Например, это может быть поголовье скота животноводческих ферм, объемы производства продукции сельскохозяйственных предприятий и др. Используются различные значки, их комбинации, группировки.

*Способ линейных знаков* применим при отображении линейных объектов и сооружений. Это различные границы, гидрографическая сеть, дороги, коммуникации и др. Видом, толщиной и цветом линий можно добиться корректного и удобного для восприятия представления на карте разнородной линейной информации.

*Способ ареалов* позволяет по качественному признаку выделить области какого-либо явления, не имеющего сплошного распространения. Например, при описании земельных площадей, подлежащих мелиоративному освоению, ареалами показывают границы древесно-кустарниковой растительности, каменистости, закочкарности и др. Изображаются ареалы граничными линиями разных рисунков, фоновой окраской, штриховками и др.

*Способ качественного фона* используется для отображения объектов (явлений), имеющих сплошное распространение. Этим способом выявляются различные по качественным особенностям

части территорий, явлений и устанавливаются их границы. Данным способом выполняется районирование территорий по различным признакам, например по неблагоприятным погодным явлениям, плотности загрязненности земель радионуклидами и др. В агрометеорологии при отображении элементов районирования в отдельных случаях особое значение имеют цвет и рисунок граничных линий. Участки в пределах выделенных границ обозначаются цветной окраской, штриховкой, массовыми штриховыми значками. В ряде случаев используют стандартные шкалы расцветки, например на геологических (почвенных) картах.

*Способ изолиний* состоит в выделении, оконтуривании участков территории линиями с определенным значением количественного показателя явления. Изолинии проводятся через точки с одинаковым значением количественного показателя, с сохранением постоянного интервала между ними или с переменным сечением по специально разработанной шкале. Изолинии используют для характеристики величины (или интенсивности) разнообразных непрерывных или постепенно изменяющихся явлений. Названия изолиний связаны с этими явлениями (изотермы, изобары, изогеты и т. п.).

*Точечный способ* используется тогда, когда необходимо отобразить явление, неравномерно распределенное по площади. За счет разной густоты точек передается картина общего размещения явления, его плотность, интенсивность развития. Разноцветные точки наглядно демонстрируют одновременное распределение различных качественных структур (видов сельскохозяйственных культур, доз внесения удобрений и др.), динамики явления (прирост посевных площадей и др.).

*Картодиаграмма* служит для отображения явления по показателю его суммарной величины в каждой из территориальных единиц. Характерным элементом знаковой системы в данном случае являются диаграммные фигуры разных видов – линейных, площадных, объемных и др.

*Картограмма* показывает интенсивность явления в его относительном развитии. Относительные показатели по каждой из территориальных единиц изображаются окраской или штриховкой разной насыщенности по ступенчатой шкале. Последние способы, картодиаграммы и картограммы, преимущественно основаны на отображении данных в рамках административно-территориального деления территорий.

С учетом изложенного, а также того, что разрабатываемые карты не только предназначены для общей качественной оценки складывающейся ситуации на конкретных территориях, но и являются источником количественной информации для исследователей и проектировщиков, в качестве основного способа построения карт выступает способ изолиний. Карта, построенная в изолиниях, дает возможность оперативно, с достаточной точностью, оценивать метеорологическую ситуацию в районе проектирования объектов различного назначения, готовить исходные данные для инженерных расчетов, которые декларируются нормативными документами Республики Беларусь, но в которых часто отсутствует база исходных данных. Возможно при построении карт использование способа качественного фона, еще более наглядного.

При выборе метода построения изолиний очень важно согласовать получаемые результаты с исходными данными. Конечно, построение карт в изолиниях можно осуществлять вручную, используя при этом традиционный метод триангуляции. Однако предпочтение следует отдавать более интенсивным и объективным способам и технологиям, базирующимся на использовании компьютерных технологий. При этом, кроме исключения субъективности исследователя, можно осуществлять картографирование различных отклонений, проводить ретроспективное сравнение картированной информации. Особенно актуально последнее. Скажем, если нужно выявить антропогенное влияние в структуре и динамике распределения по исследуемой территории метеорологических характеристик. Принятый метод картографирования должен обеспечивать однозначно точное представление данных в контрольной точке, быть непрерывным в пределах площади картографирования. Предполагается наличие автокорреляции на расстоянии, превышающем среднее расстояние между опорными точками. Автокорреляция говорит о том, что значения в соседних точках тесно связаны между собой. Это подтверждается выполненными исследованиями синхронности выпадения атмосферных осадков, в ходе которого выделены районы, объединяющие некоторое количество опорных точек.

Для построения карты требуется подготовленная математическая поверхность, разбитая на квадратные ячейки, полностью перекрывающие картируемую площадь. Чем меньше будет ячейка, тем выше получится разрешающая способность карты. Задача подготовки поверхности сводится к определению значений исследуемых показателей в узлах принятой сетки по данным близлежащих контрольных точек. Изолинии проводятся не по данным опорных точек наблюдений, а по вычисленным значениям в узлах сети. Это условие особенно важно, когда распределение точек наблюдений по территории неравномерно и их количество недостаточно для построения карты традиционными методами, например триангуляции. Если картируемую площадь разбить на крупные ячейки, то при

плавном наклоне поверхности может иметь место смещение отдельных изолиний от контрольных точек, с которыми она должна согласовываться (прохождение изолинии не с той стороны от контрольной точки).

Подавляющее большинство известных методов построения карт в изолиниях сводится к оценке значений по близлежащим контрольным точкам. В этом случае при построении карты на подготовленной математической поверхности большинство узлов интерполяции будет лежать в промежутке между значениями контрольных точек. Значения в узлах, находящихся за пределами контрольных точек, получаются экстраполяцией и будут близкими по величинам к значениям крайних точек наблюдений. Контрольные точки по отношению к узлу сети являются взвешенными, а веса устанавливаются в зависимости от их удаленности друг от друга. Сумма весов контрольных точек одного узла равна единице. В связи с этим можно установить наиболее удаленную контрольную точку от узла регулярной сети, участвующую в оценивании. Весовая функция обратных значений квадратов расстояний шкалируется, принимаемые ею значения находятся в пределах  $0 \leq w \leq 1$ . Этот процесс записывается в виде [121]

$$w = \left(1 - \frac{D}{D_{\max}}\right)^2 / \left(\frac{D}{D_{\max}}\right), \quad (5.14)$$

где  $D$  – расстояние до оцениваемой точки;  $D_{\max}$  – расстояние до наиболее удаленной точки.

Надежным критерием правильности выбранного метода является вид изолиний, который показывает, насколько точно принятая математическая модель описывает контрольные (опорные) точки. Статистически практически невозможно установить, какой метод построения изолиний надежнее. Решение принимается в каждом конкретном случае в зависимости от вида картируемой характеристики, качества исходных данных, их плотности и равномерности пространственного распределения. Основная цель построения карты в изолиниях – обеспечить максимальное соответствие исходных данных значениям, устанавливаемым картой.

Наиболее перспективными, на наш взгляд, являются следующие методы построения карт в изолиниях: метод обратных расстояний, Крайгинг, метод минимального искривления, радиальные базисные функции, метод Шепарда, метод триангуляции.

В основу *метода обратных расстояний* положено условие, что контрольные точки, используемые при оценке значений в узлах сети, сами по себе являются взвешенными. Веса изменяются в соответствии с расстояниями между оцениваемыми узлами сети и контрольными точками по функциям обратных степеней расстояний. Сумма весов должна равняться единице. Данный метод рекомендуется к использованию как достаточно точный, оперативный – при равномерном распределении контрольных точек по территории.

*Крайгинг* позволяет проводить изолинии по нерегулярно распределенным данным, он относится к группе наиболее точных методов. При его реализации используется информация из полувариограммы для нахождения оптимального множества весов, свойственных поверхности в узлах сети. Полувариограмма является функцией расстояния, поэтому веса изменяются в соответствии с географическими координатами контрольных точек. Крайгинг имеет оптимальные статистические свойства и минимизирует ошибки в случае больших расстояний между контрольными точками.

*Метод минимального искривления* генерирует поверхность как наиболее гладкую, что приводит к снижению точности картируемых характеристик. Он достаточно производителен и рекомендуется для интерполяции данных, имеющих небольшие амплитуды пространственно-временных колебаний. Предполагается наличие большого количества точек наблюдений, распределенных равномерно.

*Радиальные базисные функции* – метод, подобный Крайгингу, предпочтителен в условиях нерегулярной опорной сети. Для большинства картографируемых характеристик он является лучшим методом, так как позволяет оптимизировать весовые функции при интерполяции данных в узлах сетки.

*Метод Шепарда* подобен методу обратных расстояний, но предъявляет повышенные требования к равномерности распределения по территории контрольных точек. В противном случае создается множество сгенерированных контуров.

В *методе триангуляции* используется принцип подготовки поверхности в виде треугольников с вершинами в заданных контрольных точках. Данный метод эффективен, когда сами контрольные точки распределены равномерно и приурочены к узлам сетки. Количество контрольных точек стремится к максимуму. В случае, когда данные содержат разреженные области, изолинии представляются большими изломами.

При решении задач пространственного обобщения агроклиматических характеристик для целей статистического прогнозирования нами используются вышеназванные альтернативные методы. Так,

на рисунке 5.2 приведены изогии атмосферных осадков на территории Беларуси в средний много-летний год, построенные различными методами. Причем интерполяция осадков по контрольным точкам различными методами в итоге дает неодинаковые результаты (величины атмосферных осадков даются в мм слоя воды).

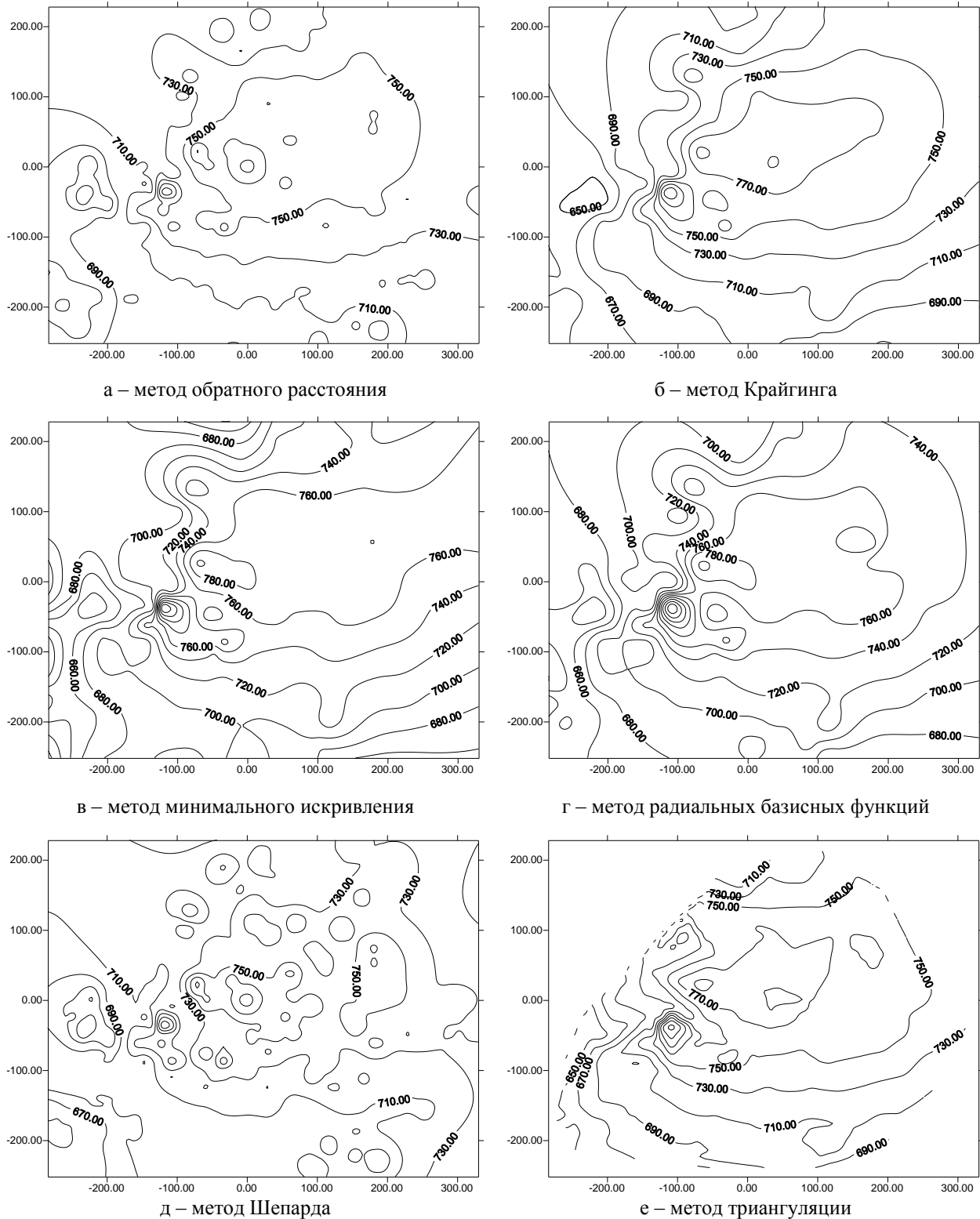


Рисунок 5.2 – Изогии атмосферных осадков на территории Беларуси в средний многолетний год, полученные различными методами

Выполненный детальный анализ точности построения изолиний, их соответствия опытным данным в контрольных точках показал, что наиболее приемлемым на территории Беларуси является данным *Крайгинг*. Учитывая также, что отдельные агроклиматические характеристики представлены недостаточным количеством опытных данных, которые неравномерно распределены по исследуемой терри-

тории, этот метод рекомендуется в качестве основного при построении изолиний. По мере необходимости при сравнительном анализе нами используются в рабочем порядке карты, построенные с применением альтернативных методов.

Подготовка поверхности и само построение карты реализуется программой SURFER. Результаты построения карты изогийет среднемноголетних величин атмосферных осадков, по данным 396 пунктов наблюдений, приведены на рисунке 5.3.

Построение карты в изолиниях основано на интерполяции данных между эмпирическими точками и экстраполяции их на периферию. Допускается, что наблюдаемые значения агроклиматических характеристик в точке (m) и близлежащих точках тесно скоррелированы, так как картируемая переменная положительно автокоррелирована на малых расстояниях, между точками можно построить непрерывную поверхность. Степень пространственной непрерывности регионализованной переменной выражается вариограммой. При наличии данных в рассеянном множестве точек и известной форме вариограммы оценивается независимое значение поверхности в любой точке, не принадлежащей выборке (Z). Процедура оценки названа крайгингом в честь Д. Г. Криге [121].

Крайгинг нами обоснован для целей картирования агроклиматических характеристик в изолиниях, его отличают оптимальные статистические свойства (измерение ошибки или неопределенности поверхности, изображаемой изолиниями, использование полувариограммы для нахождения оптимального множества весов, оценки поверхности в точках, отличных от эмпирических, в функции расстояния и веса, изменяющихся в соответствии с географическим положением точек наблюдений за исследуемыми характеристиками).

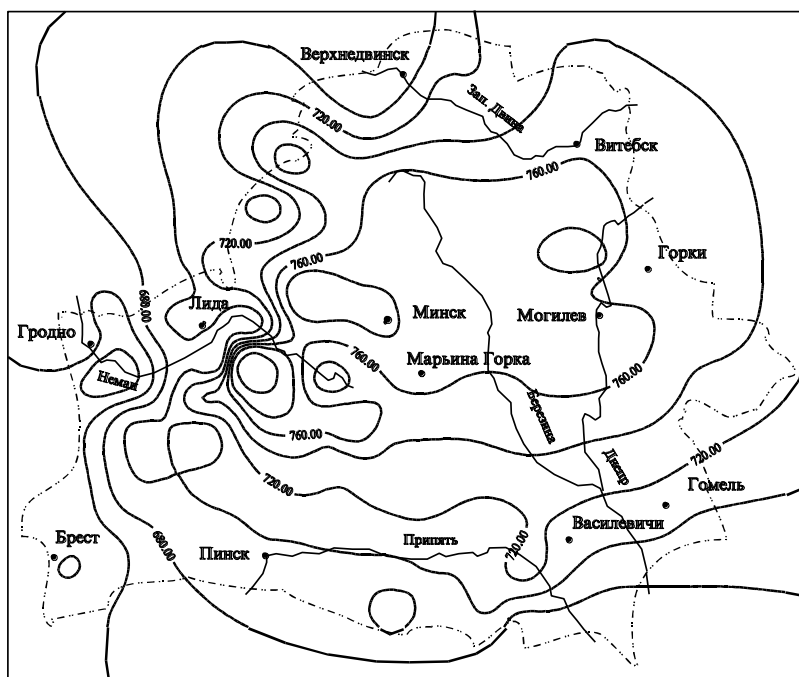


Рисунок 5.3 – Изогииеты атмосферных осадков на территории Беларуси в средний многолетний год

Особенности крайгинга [121] при построении карты в изолиниях следующие. Используется допущение, что картируемая переменная статистически стационарна и свободна от ярко выраженного тренда. Значение в точке (m), не принадлежащей эмпирической выборке, оценивается как взвешенное среднее из наблюдаемых, т. е. при ограниченном множестве близлежащих контрольных точек

$$\hat{X}_{\text{сн. m}} = \sum W_i X_{\text{сн. i}}, \tag{5.15}$$

где  $W_i$  – весовой коэффициент для i-той точки,  $X_{\text{сн. i}}$  – значение агроклиматической характеристики в i-той точке.

Оценка ( $\hat{X}_{\text{сн. m}}$ ) отличается от истинного (неизвестного) значения ( $X_{\text{сн. m}}$ ) на величину ошибки оценки

$$\varepsilon_m = \hat{X}_{\text{сн. m}} - X_{\text{сн. m}}. \tag{5.16}$$

При сумме весов, равной единице, полученная характеристика является несмещенной (при условии отсутствия тренда), т. е. для большого множества оценок средняя ошибка равна нулю, так как положительные и отрицательные отклонения взаимно компенсируются. Но и при нулевой сред-

ней ошибке сами оценки могут быть широко рассеянными относительно истинных значений. Рассеяние характеризуется дисперсией ошибки

$$S_e^2 = \frac{1}{n} \sum (\hat{X}_{\text{сн.м}} - X_{\text{сн.м}})^2 \quad (5.17)$$

Практическое определение значений, расположенных за пределами точек инструментальных наблюдений, осуществляется по крайгингу, обеспечивающему минимальную ошибку оценки.

Оптимальные значения весовых коэффициентов находятся решением системы совместных уравнений, которые включают значения из вариограммы оцениваемых агроклиматических характеристик при условии, что окончательные оценки являются несмещенными и имеют минимальную дисперсию. Другие возможные линейные комбинации наблюдений не дают оценки с меньшим рассеянием относительно их истинных значений.

Простой случай крайгинга – оценка агроклиматических характеристик ( $X_{\text{сн.}}$ ) в точке (m) по трем ближайшим метеопунктам. Решается система трех уравнений

$$\begin{cases} W_1\gamma(h_{11}) + W_2\gamma(h_{12}) + W_3\gamma(h_{13}) = \gamma(h_{1m}) \\ W_1\gamma(h_{12}) + W_2\gamma(h_{22}) + W_3\gamma(h_{23}) = \gamma(h_{2m}) \\ W_1\gamma(h_{13}) + W_2\gamma(h_{23}) + W_3\gamma(h_{33}) = \gamma(h_{3m}) \end{cases}, \quad (5.18)$$

где  $\gamma(h_{ij})$  – полувариограмма на расстоянии (h), соответствующем интервалу между контрольными точками i и j.

Например,  $\gamma(h_{13})$  – полувариограмма для расстояния между известными точками 1 и 3;  $\gamma(h_{1m})$  – полувариограмма для расстояния между известной точкой 1 и точкой (m), в которой производится оценка. Матрица в левой части системы симметрична, так как  $h_{ij} = h_{ji}$ . Диагональные элементы матрицы равны нулю, так как ( $h_{ii}$ ) представляет расстояние точки от себя самой, равно нулю. В предположении, что полувариограмма проходит через начало координат, для нулевого расстояния полувариограмма равна нулю. Значения полудисперсии берутся из полувариограммы, которая должна быть известна или оценена до крайгинга.

Однако для обеспечения несмещенности решения необходимо наложить ограничение на веса: их сумма должна быть равна единице

$$W_1 + W_2 + W_3 = 1,0 \quad (5.19)$$

В итоге получается набор четырех уравнений для трех неизвестных. Так как уравнений больше, чем неизвестных, для обеспечения минимально возможной ошибки при оценке необходимо использовать дополнительные степени свободы путем включения в систему уравнений переменной ( $\lambda$ ), называемой множителем Лагранжа и являющейся свободным членом. Полная система уравнений имеет следующий вид

$$\begin{cases} W_1\gamma(h_{11}) + W_2\gamma(h_{12}) + W_3\gamma(h_{13}) + \lambda = \gamma(h_{1m}) \\ W_1\gamma(h_{12}) + W_2\gamma(h_{22}) + W_3\gamma(h_{23}) + \lambda = \gamma(h_{2m}) \\ W_1\gamma(h_{13}) + W_2\gamma(h_{23}) + W_3\gamma(h_{33}) + \lambda = \gamma(h_{3m}) \\ W_1 + W_2 + W_3 + 0 = 1,0 \end{cases}, \quad (5.20)$$

или в матричной форме

$$\begin{bmatrix} \gamma(h_{11}) & \gamma(h_{12}) & \gamma(h_{13}) & 1 \\ \gamma(h_{12}) & \gamma(h_{22}) & \gamma(h_{23}) & 1 \\ \gamma(h_{13}) & \gamma(h_{23}) & \gamma(h_{33}) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(h_{1m}) \\ \gamma(h_{2m}) \\ \gamma(h_{3m}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

В общем виде необходимо решить матричное уравнение  $[A] \cdot [W] = [B]$  для вектора неизвестных коэффициентов  $[W]$ . Члены матрицы  $[A]$  и векторы  $[B]$  берутся непосредственно из полувариограммы или из математических функций, описывающих ее вид.

При известных весах значение оцениваемой переменной в точке (m) устанавливается как

$$\hat{X}_{\text{сн.м}} = W_1 X_{\text{сн.1}} + W_2 X_{\text{сн.2}} + W_3 X_{\text{сн.3}} \quad (5.22)$$

Оценка дисперсии имеет вид

$$S_e^2 = W_1\gamma(h_{1m}) + W_2\gamma(h_{2m}) + W_3\gamma(h_{3m}) + \lambda \quad (5.23)$$



Дисперсия оценки является взвешенной суммой полудисперсий для расстояний до точек, использованных в оценивании, и переменной ( $\lambda$ ). Таким образом, крайгинг минимизирует ошибки в случае нерегулярной сети и дает количественное выражение ошибок.

Рассмотренная методика крайгинга реализуется для статистически стационарной переменной. В действительности в природных процессах принято выделять трендовую составляющую, при которой вычисленные значения будут систематически занижаться или завышаться, что зависит от фактического размещения точек наблюдений за агроклиматическими характеристиками и направления плоскости тренда. В этом случае нестационарная регионализованная переменная рассматривается как состоящая из двух компонент. Тренд – это среднее или ожидаемое значение регионализованной переменной в пределах района, которое медленно изменяется, представляя нестационарную часть поверхности. Остаток – это разность между действительными изменениями и трендом. Если из регионализованной нестационарной переменной устранить тренд, то остатки станут стационарными, и к ним можно применить крайгинг. В этом случае крайгинг состоит из следующих процедур:

- выявление трендовой составляющей и ее удаление;
- проведение крайгинга для полученных остатков в точках вне пределов инструментальных наблюдений;
- группировка полученных остатков с трендовыми составляющими и получение истинной поверхности.

Примеры нашего анализа поверхностей тренда для агроклиматических характеристик приведены ниже, где также получены остатки, представляющие собой стационарную переменную.

В систему уравнений (5.20) и (5.21) вводятся дополнительные переменные, учитывающие трендовую составляющую в пределах локальной поверхности. Выражения тренда связаны географическими координатами контрольных точек и точек, в которых проводится оценка. Оцениваемые точки расположены в узлах прямоугольной сетки, задаваемой по мере необходимости с определенным шагом. Скорректированные уравнения (5.20) и (5.21) позволяют одновременно оценивать как трендовую компоненту, так и регионализованную переменную. Однако в оценке значений в узловой точке необходимо использовать большее количество контрольных точек, чем в случае со стационарными переменными, для обеспечения дополнительных степеней свободы при оценке коэффициентов крайгинга. В противном случае процесс крайгинга приведет к одинаковым оценкам как для тренда, так и для самой стационарной поверхности.

Методы картографирования широко используют при исследовании природно-агроекологических систем. При этом тренд-анализ позволяет по эмпирическим данным выделить систематическую и случайную компоненты [59]. Тренд представляет собой плоскость, описанную аппроксимирующей функцией.

В структуре природных процессов выделяются глобальная (систематическая), региональная и локальная (случайная) составляющие. Эти понятия достаточно субъективны и зависят от размеров исследуемой территории. Глобальную (фоновую) компоненту легко оценить с помощью линейной поверхности тренда, отражающей зависимость природного процесса от общепланетарных факторов, географической широты и долготы местности. Например, линейная поверхность тренда годовых величин атмосферных осадков на территории Беларуси представляет собой плоскость, ориентированную с юго-запада на северо-восток с градиентом увеличения осадков в пределах Беларуси около 90 мм (рис. 5.4 а). Для оценки региональной составляющей требуется построение поверхности тренда с использованием полиномов различных степеней, например,  $n = 2$  (рис. 5.4 б). Как видно на рисунке, большее количество атмосферных осадков формируется в центральной части территории Беларуси. Здесь существенен вклад в величины атмосферных осадков высоты местности как регионального фактора (Минская, Новогрудская возвышенности) [60].

Более наглядно выявить региональную составляющую позволяет сравнительный анализ хода изогет величин атмосферных осадков (рис. 5.3) и линейной поверхности тренда (рис. 5.4 а). На рисунке 5.5 картированы выявленные расхождения в величинах атмосферных осадков. Для проведения комплексного анализа приводим карту рельефа местности Беларуси (рис. 5.6).

На рисунке 5.5 заштрихованные области представляют собой положительные разности, наглядно характеризующие вклад региональной составляющей в формирование и распределение атмосферных осадков по исследуемой территории (охваченной инструментальными наблюдениями).

Ядро карты разностей атмосферных осадков, как видим, близко по форме к ядру полиномиальной поверхности тренда (рис. 5.4 б) и по очертанию сходно с горизонталями местности, особенно при разностях в осадках более 40 мм, т. е. их очертания и очертания возвышенностей идентичны (рис. 5.6).

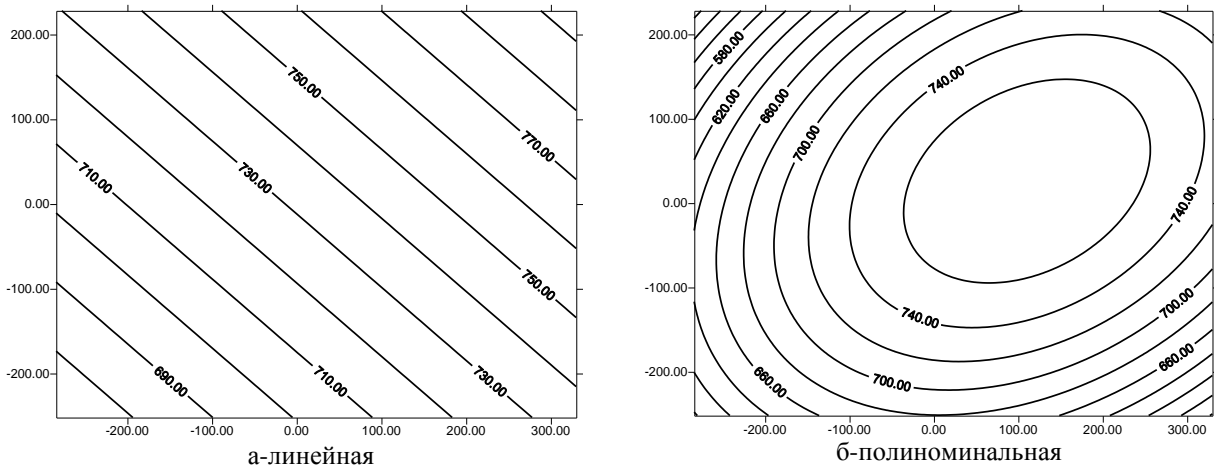


Рисунок 5.4 – Поверхности тренда атмосферных осадков на территории Беларуси для среднего многолетнего годового периода

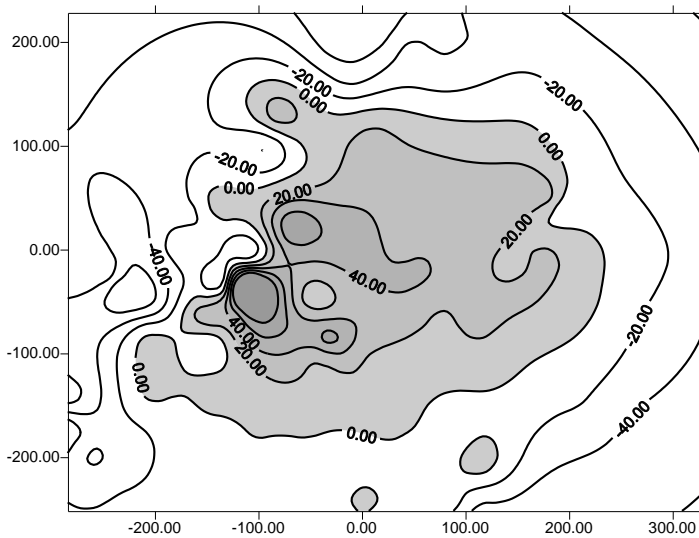


Рисунок 5.5 – Карта разностей величин атмосферных осадков (рис. 5.3) и линейной поверхности тренда (рис. 5.4 а) в средний многолетний год (вклад региональных факторов)

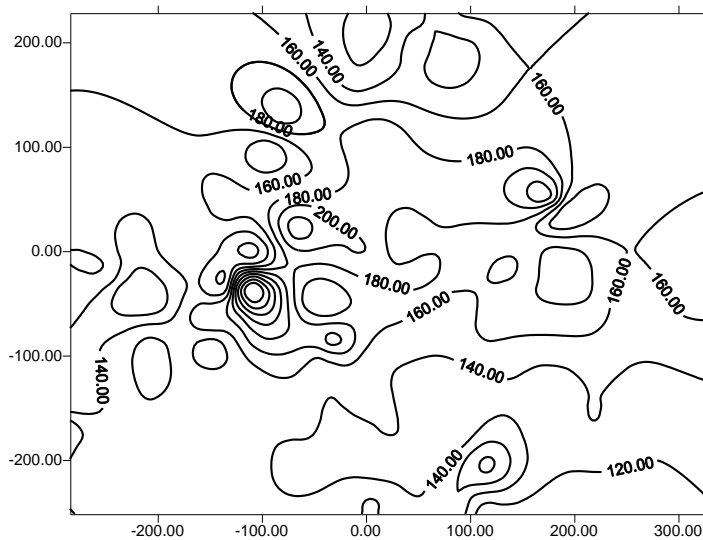


Рисунок 5.6 – Карта рельефа местности Беларуси

Оценка местных факторов в режиме выпадения атмосферных осадков на локальные участки исследуемой территории осуществлена по разности изогиев атмосферных осадков (рис. 5.3) и полиномиальной поверхности тренда (рис. 5.4 б). Результаты исследования приведены на рисунке 5.7, где штриховкой показаны положительные разности в величинах атмосферных осадков.

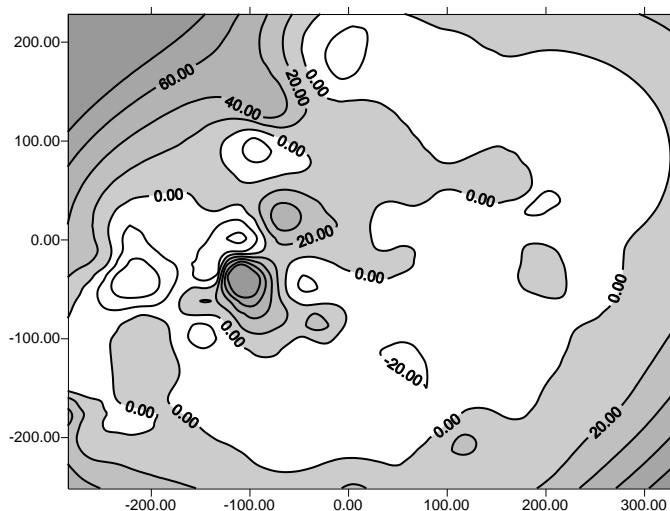


Рисунок 5.7 – Карта разностей величин атмосферных осадков (рис. 5.3) и полиномиальной поверхности тренда (рис. 5.4 б) в средний многолетний год (вклад местных факторов)

При картографировании физико-географических характеристик, и прежде всего величин атмосферных осадков, помимо всего прочего, необходимо учитывать влияние орографической тени.

В средний многолетний год на территории Беларуси преобладает юго-западное – северо-восточное и западно-восточное направление влагопереноса в атмосфере. В связи с этим нами установлено качественное влияние орографии местности на режим выпадения осадков (рис. 5.8), т. е. выявлено существенное снижение сумм атмосферных осадков в средний многолетний год на подветренных склонах (рис. 5.8, темные зоны).

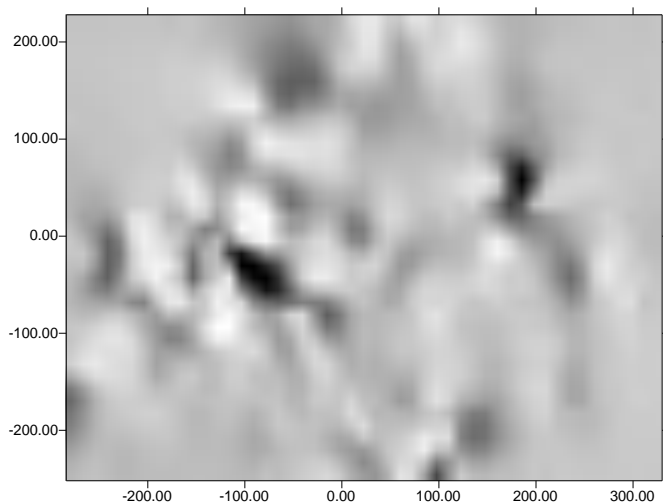


Рисунок 5.8 – Влияние орографических факторов распределения атмосферных осадков по территории Беларуси (орографическая тень представлена темными зонами)

Тренд-анализ наглядно подтверждает соответствующий вклад в формирование и распределение атмосферных осадков по территории Беларуси фоновых, региональных и местных факторов, что аналитически обосновано.

Серьезной проблемой в устойчивом и динамичном развитии экономики Белорусского Полесья, ее водного хозяйства являются опасные (стихийные) гидрометеорологические явления. К ним относят [569]: заморозки, засухи и засушливые явления, опасные дожди, грозы, град, шквалы и смерчи, туманы, оттепели, метели, опасно низкие температуры воздуха и почвы. Наиболее характерным показателем экстремальных ресурсов естественного увлажнения является суточный максимум атмосферных осадков. Экстремальные термические ресурсы обуславливаются прежде всего максимальными и минимальными температурами воздуха.

Многие авторы отмечают рост вероятности наступления негативных погодных явлений [73, 169]. В связи с этим для планирования мероприятий по рациональному природопользованию и предотвращению возможных ущербов для мелиорируемых земель надо четко выделить районы, подверженные влиянию погодных аномалий, и предусмотреть в дальнейшем адекватные компенсационные мероприятия [79, 81].

Максимальные осредненные суммы атмосферных осадков  $\geq 100$  мм приходятся на районы Ляховичей, Бобруйска и Толочина (рис. 5.9). Изотерма  $35,0$  °С (рис. 5.10) проходит примерно по линии: Лида, Барановичи, Минск, Борисов, Березино, Бобруйск, Чечерск. Абсолютные минимумы, ниже  $-35,0$  °С, имеют место практически на всей территории Беларуси, за исключением отдельных районов Гродненской, Минской и Брестской областей (рис. 5.11).

Сравнение рисунков 5.9–5.11 с картами средних величин соответствующих характеристик показывает их расхождение. Максимальные (минимальные) из средних значений (в одном и том же пункте наблюдений) не совпадают с экстремальными значениями, что делает интересным изучение механизма формирования погодных аномалий на территории Беларуси в целом и Белорусского Полесья в частности.

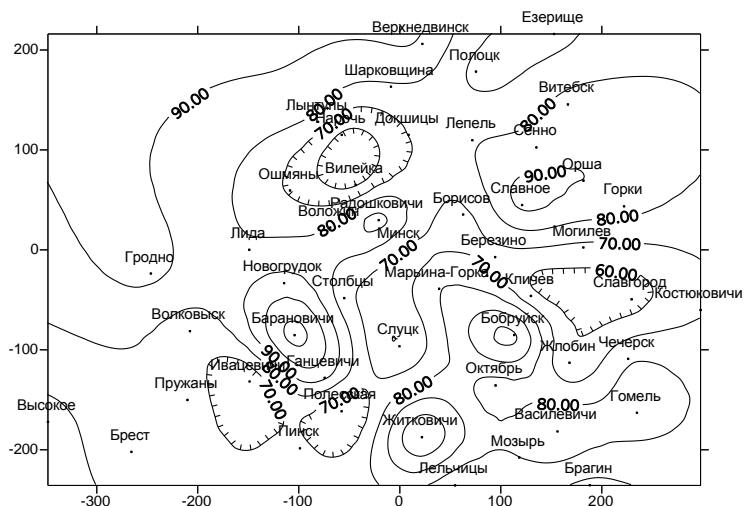


Рисунок 5.9 – Максимальные осредненные суточные суммы атмосферных осадков на территории Беларуси, мм

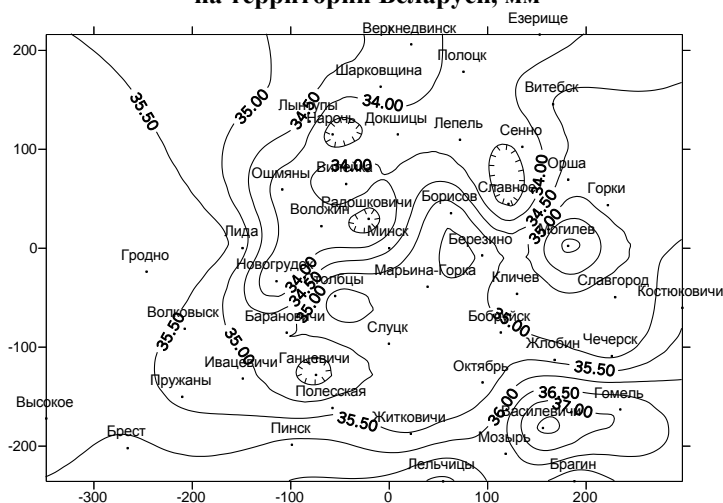


Рисунок 5.10 – Максимальная осредненная температура воздуха на территории Беларуси, °С

Для выявления глобальной (фоновой), региональной и локальной составляющих в структуре формирования экстремальных ресурсов тепловлагообеспеченности выполнен анализ поверхностей тренда [79, 81]. На рисунках 5.12–5.14 показаны линейные и полиномиальные поверхности тренда исследуемых погодных аномалий.

Линейные поверхности тренда (рис. 5.12–5.14 а) указывают на факт глобального (вне пределов Беларуси) начала в формировании погодных аномалий. Максимальное количество осадков уменьшается по направлению юго-запад – северо-восток с небольшим градиентом около 3 мм. Максимальная температура воздуха уменьшается по направлению юг – север с некоторым смещением на северо-запад, при градиенте около 2 °С. Минимальная температура изменяется строго по направлению юго-запад – северо-восток, с градиентом в пределах Беларуси около 5,5 °С.

Полиномиальные поверхности тренда (рис. 5.12–5.14 б) отражают региональные особенности метеорологического режима Беларуси. В частности, экстремальный режим увлажнения определяют прежде всего рельефные условия. Наибольшие значения атмосферных осадков приходятся на цен-

тральные районы, окруженные Новогрудской, Минской и Оршанской возвышенностями. Выделяется ядро с центром в районе Житковичей. Здесь регистрируется наибольшее число дней в году с грозой [169]. Как известно, ливневые осадки часто сопровождаются грозами, и в это время выпадает большое количество осадков, что подтверждается данными рисунка 5.12 б. Экстремальный температурный режим формируется комплексом факторов с преобладанием адвективной составляющей турбулентного теплообмена приземной атмосферы. В летний период велико влияние Азорского максимума, регенерирующего антициклоны [169].

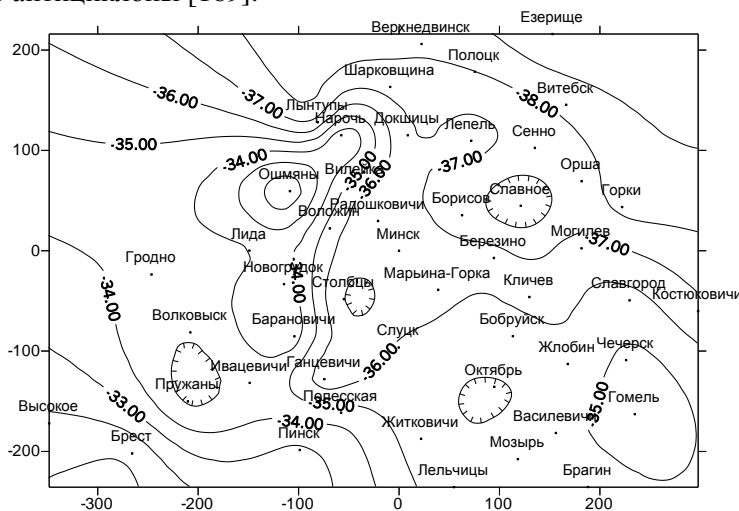


Рисунок 5.11 – Минимальная средняя температура воздуха на территории Беларуси, °С

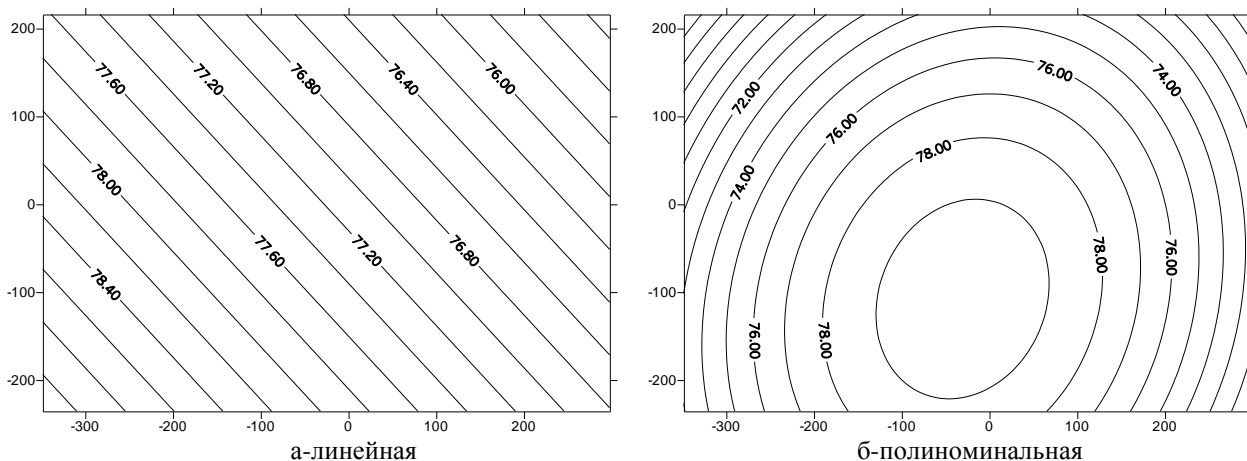


Рисунок 5.12 – Поверхности тренда максимальных средних суточных сумм атмосферных осадков на территории Беларуси, мм

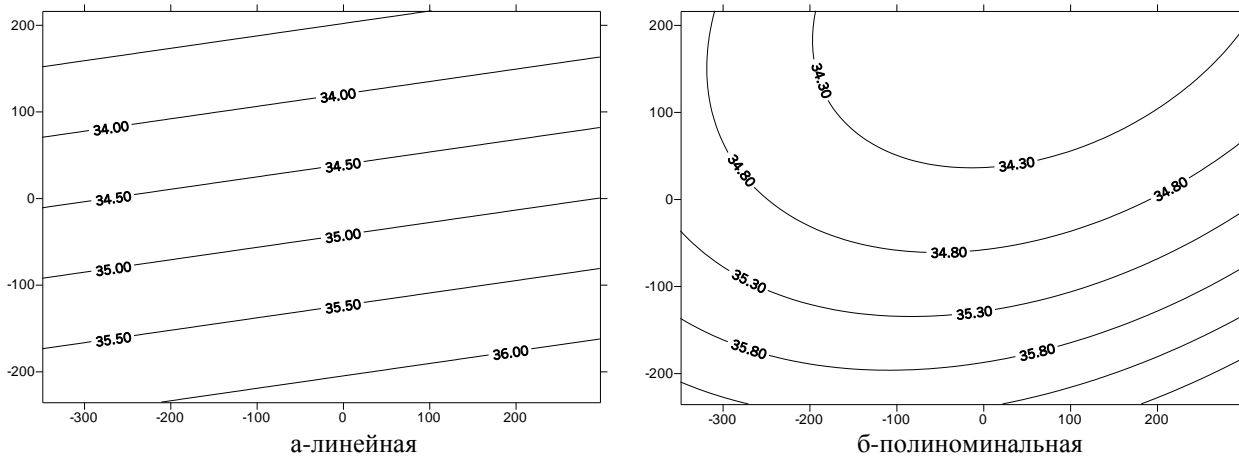


Рисунок 5.13 – Поверхности тренда максимальной средней температуры воздуха на территории Беларуси, °С

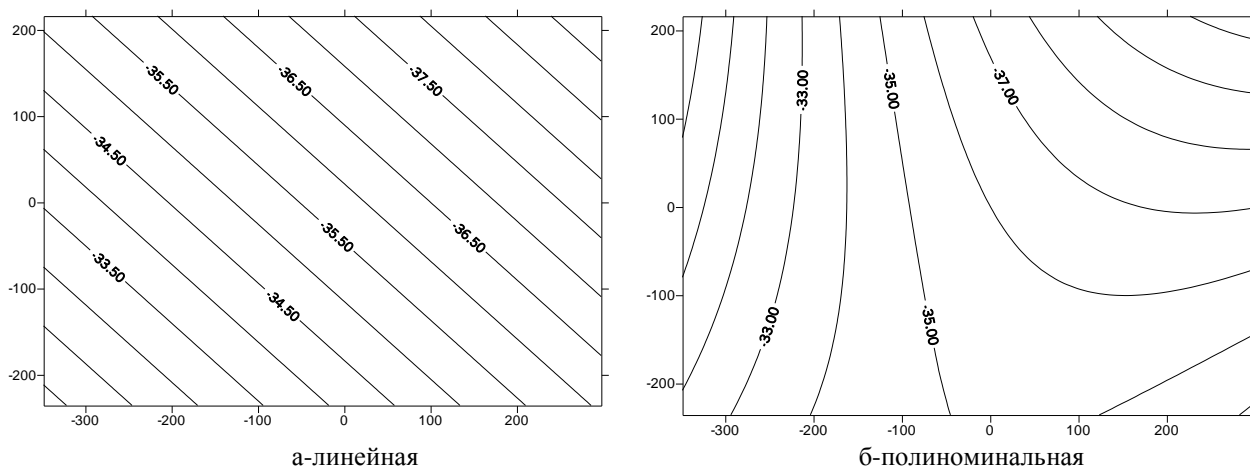


Рисунок 5.14 – Поверхности тренда минимальной осредненной температуры воздуха на территории Беларуси, °С

Ось эллипса (рис. 5.13 б) соответствует направлению движения антициклонов. Малая облачность способствует прогреванию воздуха в процессе его перемещения в северо-восточном направлении. Теплые потоки воздуха в пределах Беларуси огибают возвышенности (рис. 5.13 б), проходят по долинам, которые в итоге лучше прогреваются. В формировании абсолютных минимумов также велика роль адвекции на фоне радиационного выхолаживания земной поверхности. Четко позиционируются северо-восточные районы Беларуси с температурами воздуха  $-37,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже (рис. 5.14 б).

Оценить локальную составляющую погодных аномалий возможно в ходе анализа разностей величин исследуемых характеристик и их тренд-поверхностей (рис. 5.15–5.17). На рисунках 5.15–5.17 фоном представлены разности, наглядно характеризующие локальные особенности в формировании погодных аномалий на территории Беларуси. Данные карты показывают районы, наиболее подверженные влиянию негативных природных процессов, и могут быть полезны при разработке территориальных защитных мероприятий.

Рисунок 5.15 показывает наибольшую возможную уязвимость со стороны экстремально высоких суточных сумм осадков территорий Новогрудской, Минской и Оршанской возвышенностей и большей части территории Гомельской области, т. е. Белорусского Полесья. Наибольшее отклонение максимальных суточных сумм осадков (около 40 мм) от поверхности тренда наблюдается в районе Барановичей. Рисунок 5.15 хорошо увязывается с повторяемостью (% лет с явлением к числу лет обобщения) рассматриваемого стихийного явления. Положительные разности в основном соответствуют районам с наибольшей повторяемостью максимальных осадков. Исключение составляет район Бобруйска. Относительно благополучными в смысле экстремального режима выпадения осадков являются районы, расположенные по линии: Брест – Пинск – Полесская – Слуцк – Борисов – Докшицы – Полоцк – Езерище. Здесь значения максимальных сумм осадков остаются на уровне или ниже фоновых [79].

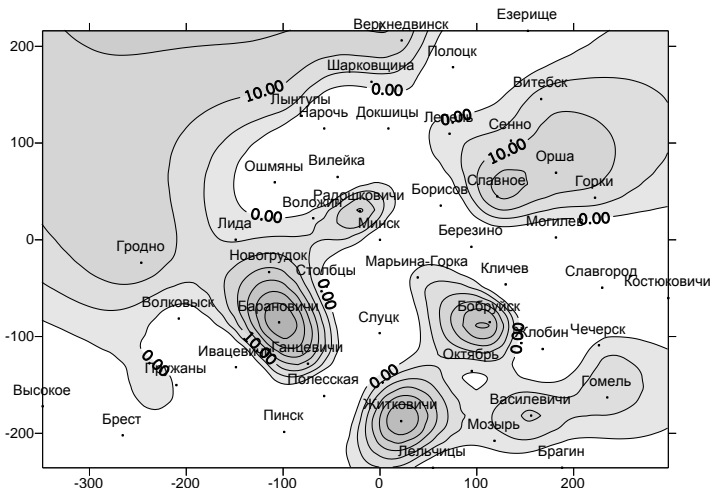


Рисунок 5.15 – Карта разности максимальных осредненных суточных сумм атмосферных осадков (рис. 5.9) и линейной поверхности тренда (рис. 5.12 а), мм

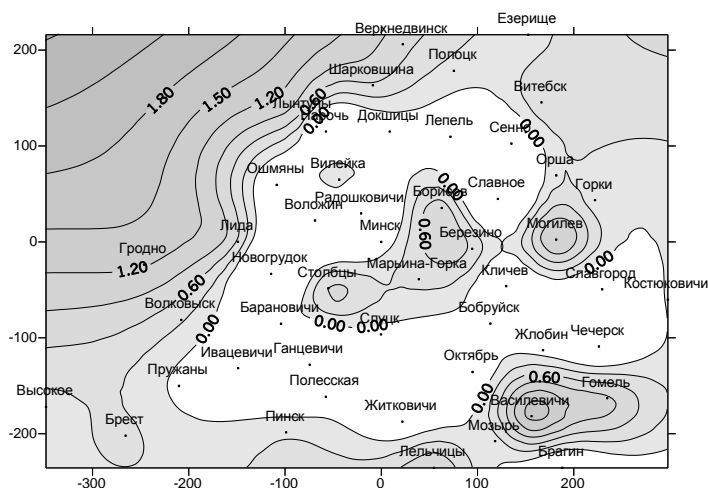


Рисунок 5.16 – Карта разности максимальной осредненной температуры воздуха (рис. 5.10) и линейной поверхности тренда (рис. 5.13 а), °С

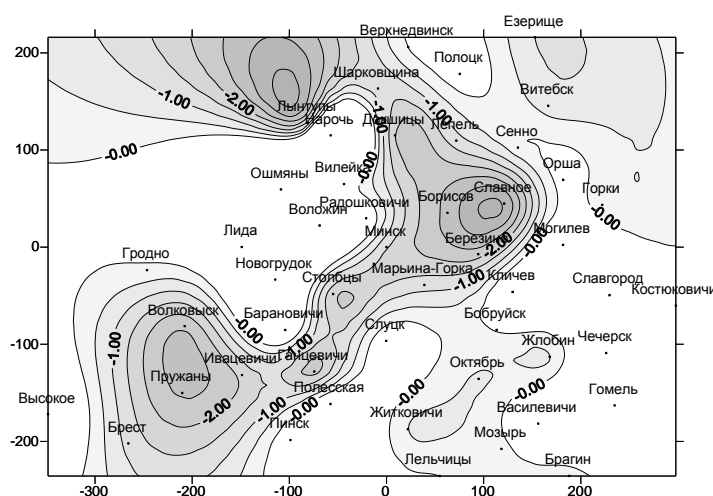


Рисунок 5.17 – Карта разности минимальной осредненной температуры воздуха (рис. 5.11) и линейной поверхности тренда (рис. 5.14 а), °С

Распределение локальной составляющей максимальных температур воздуха по территории Беларуси (рис. 5.16) увязывается, как было отмечено выше, с турбулентным теплообменом приземной атмосферы. Максимальные отклонения соответствуют равнинным территориям, достигая 1,6 °С на Оршанско-Могилевской равнине, в Гомельском Полесье. Наибольшие отклонения минимальных температур воздуха от поверхности тренда наблюдаются по линии: Брест, Пружаны, Ганцевичи, Столбцы, Марьина Горка, Борисов, Славное, Лынтупы. Максимальные отклонения температур здесь доходят до –3,8 °С в ядрах условных районов: Пружаны – Волковыск – Ивацевичи; Славное – Борисов – Березино. Рисунки 5.16 и 5.17 достаточно хорошо согласуются с пространственным распределением по территории Беларуси повторяемостей экстремально высоких и низких температур воздуха [81].

Таким образом, анализ поверхностей тренда позволяет выделить глобальные, региональные и локальные составляющие в распределении по исследуемой территории Белорусского Полесья погодных аномалий. В выделенных районах должны предусматриваться первоочередные комплексные защитные мероприятия, исключающие и снижающие негативное воздействие стихийных гидрометеорологических явлений на водохозяйственный комплекс и окружающую среду региона.

Как было отмечено выше, пространственное обобщение основных агроклиматических характеристик осуществляется картографическими способами, как правило, изолиний или качественного фона. Для целого ряда прикладных задач требуется выполнение районирования искомых агроклиматических характеристик. Например, снеготпасы, формирующие снеговые нагрузки на поверхности земли, представляют собой величины, осредненные в пространстве и во времени. Особенностью оценок снеготпасов ( $X_{сн.}$ ) является тот факт, что их значения задаются не на множестве точек пространства, а во множестве характерных районов. Построение карты снеготпасов сопровождается эмпирическими оценками ( $X_{сн. i}$ ) в центрах тяжести ( $t_i$ ) соответствующих районов. Переход от множества то-

чек пространства к множеству районов осуществляется путем построения интерполяционной карты и решения регрессионного уравнения функции  $X_{\text{сн.}}(t_i)$  по выборке  $Z = (X_{\text{сн. } 1}, t_1, \dots, X_{\text{сн. } n}, t_n)$ . Задача решается в последовательности:

- построение карты в изолиниях;
- предварительное установление границ районов на основе выбранного шага количественных различий снегозапасов в пределах характерных районов;
- уточнение границ районов с учетом физико-географических особенностей формирования снеговых нагрузок при объединении гидрометеорологических характеристик в пространственно-временные поля с учетом синхронности их колебания;
- аналитическая интерпретация границ районов с использованием типизированных аппроксимирующих функций в контексте прогнозирования снеговых нагрузок;
- проверка точности карты статистическими методами.

Оценка точности районирования агроклиматических характеристик может осуществляться статистическими методами. При выделении однородных районов, близких по физико-географической природе и статистической изменчивости, выполняется анализ меры расхождения исходных данных в опорных пунктах (i) и (j) районов. В качестве критерия при многомерном статистическом анализе можно использовать расстояние Махаланобиса [599]

$$d_{ij} = \frac{(X_{\text{сн.}i} - X_{\text{сн.}j})}{\sqrt{D_i + D_j - 2\rho_{ij}\sqrt{D_i D_j}}}, \quad (5.24)$$

где  $X_{\text{сн. } i}$ ,  $X_{\text{сн. } j}$  – значения агроклиматических характеристик в пунктах (i) и (j);  $D_i$ ,  $D_j$  – дисперсии ошибок исходных данных в соответствующих пунктах;  $\rho_{ij}$  – коэффициент пространственной корреляции ошибок между соответствующими пунктами.

В случае равенства значений ( $X_{\text{сн. } i}$ ) и ( $X_{\text{сн. } j}$ ) статистика ( $d_{ij}$ ) укладывается в нормальный закон распределения вероятностей с нулевым средним и единичной дисперсией. Показатель ( $d_{ij}$ ) выявляет опорные пункты, в которых различия находятся в пределах точности определения агроклиматической характеристики. Анализ всевозможных значений ( $d_{ij}$ ) при  $i, j = 1, \dots, n$  для заданного уровня значимости позволяет выделить территории, в границах которых различия между исходными данными пунктов наблюдений за исследуемыми характеристиками можно считать несущественными.

По представленным в настоящем разделе методикам построены все карты, приведенные в книге 1 «Белорусское Полесье» монографии «Природообустройство Полесья».

## **5.2. Моделирование урожайности сельскохозяйственных культур (на примере территории Брестской области)**

### **5.2.1. Актуальность и необходимость учета естественных и антропогенных факторов, определяющих урожайность сельскохозяйственных культур**

Агроклиматические ресурсы территории Брестской области являются наиболее благоприятными для производства растениеводческой продукции и решения проблемы обеспечения продовольственной безопасности страны. Вопросы устойчивого развития региона приобрели особую актуальность в современных условиях, когда климатические, агроклиматические и водные ресурсы начали испытывать значительные антропогенные трансформации различных временных и пространственных масштабов. В ряде случаев эти изменения превышают их естественную изменчивость, что влияет на устойчивость экосистем, обостряет проблему адаптации экосистем к изменяющимся условиям. Сельское хозяйство, особенно земледелие, в значительной степени подвержено влиянию неблагоприятных погодно-климатических условий, снижающих продуктивность агроценозов. Учитывая важность проблемы и необходимость предотвращения и смягчения влияния негативных процессов на различные отрасли хозяйственной деятельности, Указом Президента Республики Беларусь от 10 апреля 2000 г. № 117 была подписана Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата, а в 2001 г. подписана Конвенция ООН по борьбе с опустыниванием. Для оценки происходящих в регионе климатических изменений и принятия конкретных решений необходимы серьезные систематические исследования, объективная и достаточная информация в области изучения колебаний климата и влияния их на хозяйственную деятельность.

Оценка влияния климата на урожайность основных сельскохозяйственных культур области весьма актуальна в связи с наблюдающимся увеличением с начала 1990-х годов вероятности возникновения неблагоприятных погодных явлений, их интенсивности и продолжительности. Климатические аномалии оказывают существенное воздействие на продуктивность культур. Ведение земледе-