



Математико-картографическое моделирование пространственно-временного распределения опасных явлений погоды

© Абдуллин Р. К., Шихов А. Н., 2017

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15
gis@psu.ru

Предложена методика климатического картографирования повторяемости и возможной интенсивности неблагоприятных и опасных метеорологических явлений. Моделирование их пространственного распределения основано на интерполяции многолетних данных сети метеостанций, с учётом зависимостей от морфометрических характеристик рельефа (высоты местности, угла наклона и кривизны склонов). На основе регрессионного анализа отобраны статистически значимые зависимости, которые использованы при создании серии карт повторяемости, средней и максимальной интенсивности опасных явлений погоды (на примере территории Пермского края). Предложенная методика позволяет выявить закономерности пространственного распределения опасных явлений погоды со значительно более высокой точностью и детальностью, чем традиционные детерминированные или геостатистические методы интерполяции. Достоверность полученных результатов подтверждается как по данным станционных наблюдений, так и на основе сравнения с тематическими продуктами обработки спутниковых данных MODIS. Важными преимуществами данной методики является возможность её применения для оценки риска возникновения опасных явлений погоды на территориях, по которым отсутствуют данные метеонаблюдений.

Интерполяция, картографирование, математико-картографическое моделирование, опасные явления погоды, регрессионный анализ.

Interpolation, mapping, GIS based modelling, severe weather events, regression analysis.

Введение

В эпоху современного изменения климата наблюдается рост повторяемости и интенсивности опасных и неблагоприятных метеорологических явлений (ОЯ), которые могут вызывать чрезвычайные ситуации природного характера [3]. Для разработки мероприятий по смягчению и нейтрализации негативного воздействия ОЯ необходимы количественные оценки вероятности их возникновения и возможной интенсивности. Картографирование данных характеристик позволяет в наглядной форме отображать пространственно-временное распределение ОЯ и выделять области наибольшего риска их возникновения [1].

При картографировании опасных явле-

ний погоды на региональном уровне возникает ряд проблем, которые препятствуют получению объективных данных об их пространственно-временном распределении. Во-первых, это дефицит информации о зафиксированных случаях опасных явлений, связанный с тем, что они относятся к событиям редкой повторяемости. Во-вторых, сами критерии ОЯ в последние годы неоднократно изменялись, что существенно осложняет формирование единого репрезентативного массива данных о зафиксированных случаях. И в третьих, многие опасные явления локального характера (сильные дожди, шквалы, крупный град, смерчи) пропускаются наблюдательной сетью. В связи с этим карты пространствен-

но-временного распространения опасных явлений погоды строятся чаще в обзорном масштабе, а на региональном уровне таких работ известно немного [1].

Пространственное распределение опасных метеорологических явлений характеризуется очень высокой степенью изменчивости, которая обусловлена влиянием факторов подстилающей поверхности. Важность их учёта особенно возрастает в условиях сложного рельефа. С развитием ГИС-технологий появилась возможность учитывать свойства подстилающей поверхности при средне- и крупномасштабном картографировании различных климатических параметров, в том числе опасных явлений погоды [9].

Методы интерполяции метеорологических величин с учётом факторов подстилающей поверхности разрабатываются в мире с 80-х гг. XX в. Изначально они применялись в основном для расчёта пространственного распределения метеоэлементов, необходимых в качестве входных данных в гидрологических моделях формирования стока. В России первым подобный подход реализовал А. В. Шутов для расчёта запасов воды в снежном покрове [4]. Наиболее часто при интерполяции метеорологических и климатических данных используется высотный градиент, в связи с чем данный метод интерполяции получил название «altitude-dependent-regression».

Интерполяция с использованием регрессионных моделей широко применяется в климатическом картографировании, прежде всего на региональном уровне. Одна из первых подобных работ была реализована для территории Каталонии. На основе модели множественной линейной регрессии были созданы высокодетальные реалистичные карты среднегодовой, максимальной, минимальной температуры воздуха, а также количества осадков [7]. Ряд исследований посвящён сопоставлению пригодности различных методов интерполяции для картографирования климатических характеристик. Было установлено, что регрессионные методы (или их комбинирование с методами кригинга) в большинстве случаев обеспечи-

вают высокую точность интерполяции, а для горных районов они практически не имеют альтернативы [6, 8, 9]. В некоторых случаях для объективной интерполяции температуры воздуха, кроме морфометрических характеристик рельефа, используются также продукты обработки спутниковых снимков, а именно: температура земной поверхности и вегетационный индекс NDVI [10].

Аналогичные подходы применяются и для картографирования режимных характеристик опасных метеорологических явлений, например сильных дождей в Альпах [9]. Известны также работы по картографированию распределения минимальной температуры воздуха в ночное время и оценке риска заморозков. Для решения этой задачи была разработана схема интерполяции с использованием эмпирической модели, описывающей накопление холодного воздуха в пониженных участках местности [5].

Целью настоящего исследования является выявление зависимостей режимных характеристик опасных явлений погоды от свойств подстилающей поверхности и создание на их основе серии карт на примере территории Пермского края. Для территории России подобный опыт картографирования режимных характеристик опасных явлений погоды на региональном уровне является одним из первых.

Исходные данные и методы исследования

Предметом рассмотрения в настоящей статье являются четыре вида опасных метеорологических явлений: сильная жара, сильные морозы, сильные дожди и сильные снегопады. Рассматривались такие характеристики явлений, как повторяемость (число случаев за единицу времени) и интенсивность (средняя и максимальная). Критерии ОЯ были несколько изменены в сравнении с критериями, утверждёнными для территории деятельности Уральского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Они приведены в табл. 1. Изменение критериев обусловлено необходимостью уве-



Критерии опасных метеорологических явлений, использованные при создании карт

Наименование опасных и неблагоприятных метеорологических явлений	Характеристика, критерий опасных и неблагоприятных метеорологических явлений
Сильный мороз	Минимальная температура воздуха -35°C и ниже
Сильная жара	Максимальная температура воздуха $+35^{\circ}\text{C}$ и выше
Очень сильный дождь	Количество осадков ≥ 30 мм за период ≤ 12 ч
Сильный снег	Количество осадков в виде снега ≥ 20 мм за период ≤ 24 ч

личения объёма выборки случаев, а также тем, что по некоторым явлениям действуют различные критерии ОЯ для разных метеостанций на территории региона.

Для явлений локального характера, связанных с развитием конвекции (крупного града, шквалов и смерчей), ниже описанные методы картографирования непригодны, поскольку многие их случаи пропускаются редкой наблюдательной сетью. Более перспективным подходом к картографированию локальных ОЯ является расчёт плотности пространственного распределения случаев явления.

Для создания карт были использованы данные с 25 действующих метеостанций, расположенных на территории Пермского края. Сведения об опасных явлениях погоды были взяты из метеорологических ежемесячников и ежегодников. В качестве базового исследуемого был выбран период с 2001 по 2015 гг. Выбор столь короткого временного интервала обусловлен наличием полного однородного ряда данных и неизменностью критериев ОЯ в этот период.

В основе методики построения карт режимных характеристик ОЯ лежит интерполяция данных наблюдательной сети с учётом регрессионных зависимостей от свойств подстилающей поверхности. Выбор данного подхода обусловлен наличием в пределах исследуемой территории возвышенностей и гор с абсолютной высотой до 1469 м. Барьерный эффект Уральских гор оказывает значительное влияние на распределение осадков, в том числе на повторяемость сильных дождей и снегопадов [2]. Очевидным является также существенное влияние свойств подстилающей поверхно-

сти на повторяемость экстремально низкой или экстремально высокой температуры воздуха.

Для выявления зависимостей режимных характеристик ОЯ от факторов подстилающей поверхности использовался одномерный и множественный регрессионный анализ. В качестве независимых переменных были выбраны основные морфометрические характеристики: высота местности (ALT), угол наклона склонов (SLOPE), экспозиция (ASPECT) и общая кривизна склонов (CURVATURE), которые рассчитывались по цифровой модели рельефа с размером ячейки 1000 м. С помощью инструментов зональной статистики производилось извлечение значений независимых переменных в точки, соответствующие местоположению метеостанций. Таким способом были получены значения независимых переменных, использованные для построения линейной регрессии. Характеристика полученных зависимостей повторяемости и интенсивности опасных явлений погоды от морфометрических характеристик рельефа приведена в табл. 2.

При построении карт режимных характеристик сильных дождей и снегопадов использовались уравнения множественной регрессии с учётом двух независимых переменных (ALT и SLOPE). Зависимости от экспозиции и кривизны были исключены по причине низкой значимости. При построении карт сильных морозов и сильной жары использовалась только одна независимая переменная (соответственно CURVATURE и ALT). Зависимости от остальных переменных также были исключены по причине низкой значимости.

Таблица 2

**Результаты анализа зависимостей режимных характеристик
опасных явлений погоды от физико-географических факторов**

Характеристика опасного явления	Наиболее значимые предикторы	Коэффициент детерминации (R^2)	Критерий Стьюдента (t)	Критические значения ($t_{кр}$), $P \leq 0,05$
Повторяемость сильных снегопадов	ALT/SLOPE	0,5	2,17/4,22	2,09
Повторяемость сильных дождей	ALT/SLOPE	0,41	3,00/3,23	2,08
Среднегодовой суточный максимум осадков	ALT/SLOPE	0,45	3,7/0,78	2,07
Повторяемость сильных морозов	CURVATURE	0,53	4,66	2,09
Среднегодовой минимум температуры воздуха	CURVATURE	0,52	4,90	2,07
Абсолютный минимум температуры воздуха за 30 лет	CURVATURE	0,31	3,18	2,07
Повторяемость сильной жары	ALT	0,23	2,40	2,09

Для интерполяции данных наблюдений и построения карт был адаптирован и реализован средствами программного пакета ArcGis 10.* регрессионный метод интерполяции. Ранее данный метод использовался для оценки пространственного распределения снегозапасов и предполагал использование только одной независимой переменной – высоты местности [4]. В настоящей работе для построения карт режимных характеристик сильных дождей и снегопадов были использованы две независимые переменные (ALT и SLOPE), отбор которых был проведён по значению коэффициента детерминации линейной регрессии. Реализация методики включала следующие этапы:

подготовка входных данных – расчёт режимных характеристик опасных явлений в пунктах наблюдательной сети;

построение линейной регрессии между режимными характеристиками ОЯ и независимыми переменными (физико-географическими факторами);

выбор наиболее значимого предиктора по величине коэффициента детерминации линейной регрессии (R^2) и оценка статистической значимости зависимостей с помощью t -критерия Стьюдента;

расчёт режимных характеристик ОЯ, «приведённых» к нулевому значению неза-

висимой переменной по формуле

$$X = X_0 - \Delta X / \Delta \text{var}, \quad (1)$$

где X_0 – значение зависимой переменной в точке наблюдения при известном значении var (независимой переменной), $\Delta X / \Delta \text{var}$ – зависимость, выраженная в форме градиента (например, вертикальный градиент температуры воздуха);

интерполяция «приведённой» величины. Для интерполяции использован метод натяжного сплайна, который характеризуется отсутствием краевых эффектов и рекомендуется для интерполяции данных с редкой наблюдательной сети;

введение в результат интерполяции зависимости между режимной характеристикой ОЯ и независимой переменной (данное вычисление производилось с использованием инструментов растровой алгебры);

сглаживание полученного результата методом осреднения в скользящем окне заданного размера;

получение изолиний из конечной поверхности.

Результаты и их обсуждение

В результате реализации описанной методики была получена серия карт пространственно-временного распределения

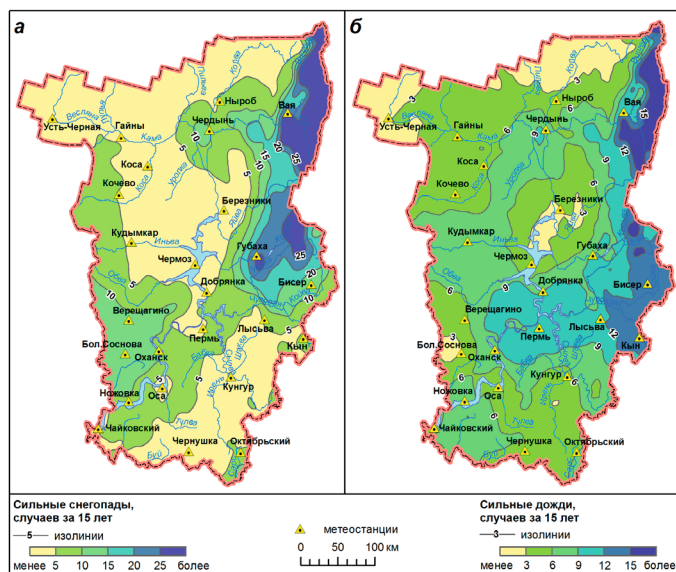


Рис. 1. Повторяемость опасных явлений, связанных с интенсивными осадками:

а – сильными снегопадами;

б – сильными дождями

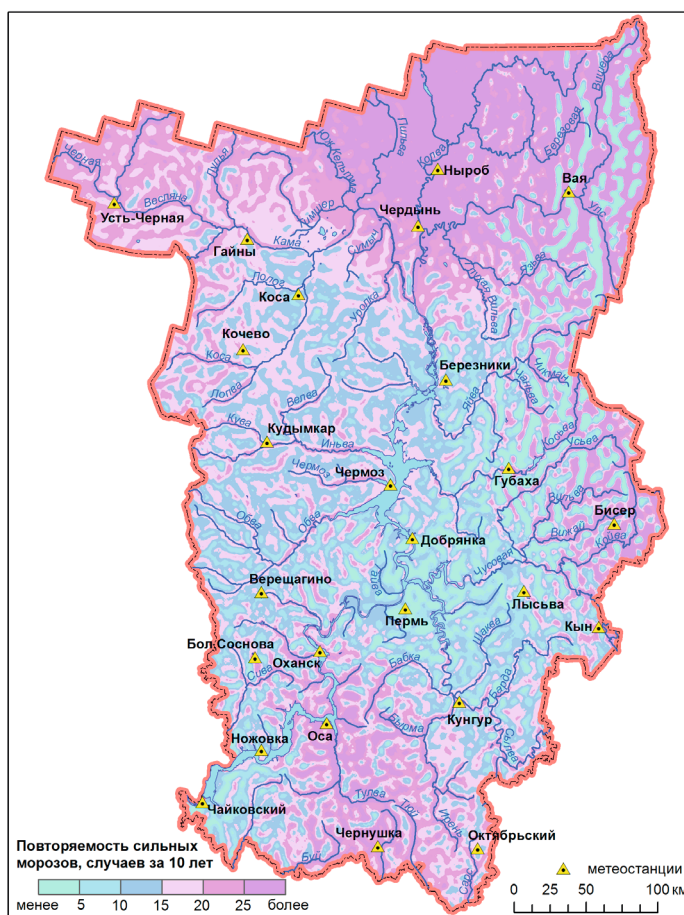


Рис. 2. Повторяемость сильных морозов с учётом зависимости от кривизны рельефа

режимных характеристик опасных метеорологических явлений.

Сильные дожди и снегопады

Общей тенденцией для опасных явлений, связанных с интенсивными осадками, является увеличение повторяемости и интенсивности с запада на восток, что связано с барьерным влиянием расположенных на востоке Пермского края Уральских гор (рис. 1). Для сильных снегопадов данная зависимость является более выраженной, что объясняется увеличением интенсивности зонального переноса воздушных масс в холодный период года. Повторяемость сильных снегопадов в горной части региона в 2,5–5 раз выше, чем на равнинной территории (рис. 2).

С увеличением высоты местности растёт и среднегодовой суточный максимум количества осадков. В горной части региона он на 6–8 мм выше, чем на равнине. Абсолютные суточные и полусуточные максимумы осадков (132 мм/24 ч и 117 мм/12 ч соответственно) также наблюдались в горной части Прикамья, на метеостанциях Бисер и Губаха, что подтверждает достоверность полученных выводов.

Сильные морозы

При картографировании режимных характеристик сильных морозов необходимо учитывать известный факт, что в зимний период при антициклональной погоде холодный воздух застаивается и выхолаживается сильнее в отрицательных формах рельефа, чем на возвышенных участках. Таким образом, смоделировать распределение температуры воздуха при сильных морозах возможно с использованием её зависимости от кривизны рельефа.

фа. Зависимость между повторяемостью сильных морозов и кривизной рельефа характеризуется обратной связью высокой степени тесноты, с коэффициентом корреляции (R) $> 0,7$. В результате повторяемость сильных морозов в пониженных формах рельефа в 2–3 раза превышает их повторяемость на возвышенных участках. Среднегодовой минимум температуры в отрицательных формах рельефа также на 2–6° ниже, чем на прилегающих возвышенностях. Помимо кривизны рельефа, на повторяемость сильных морозов влияет также широтная зональность, вследствие чего наблюдается ее увеличение к северу территории (см. рис. 2).

Адекватность полученного результата подтверждается при его сравнении с данными о температуре подстилающей поверхности, полученными на основе съёмки в тепловом диапазоне спектра со спутников Terra и Aqua в зимний период. Расчётное распределение минимальной температуры воздуха и температуры подстилающей поверхности (по спутниковым данным) имеет выраженные черты подобия, с локальными минимумами в отрицательных формах рельефа и максимумами на возвышенностях (рис. 3).

Сильная жара

Ключевым фактором, влияющим на распределение максимальной температуры воздуха в летний период, и соответственно на повторяемость сильной жары, является высота местности. В период максимального прогрева вертикальный градиент температуры обычно близок к 1 °C/100 м, это значение и использовалось при создании карт. Влияние других физико-географических характеристик на распределение максимальной температуры в летний период либо незначительно (как влияние уклона местности и кривизны рельефа), либо не отображается в мас-

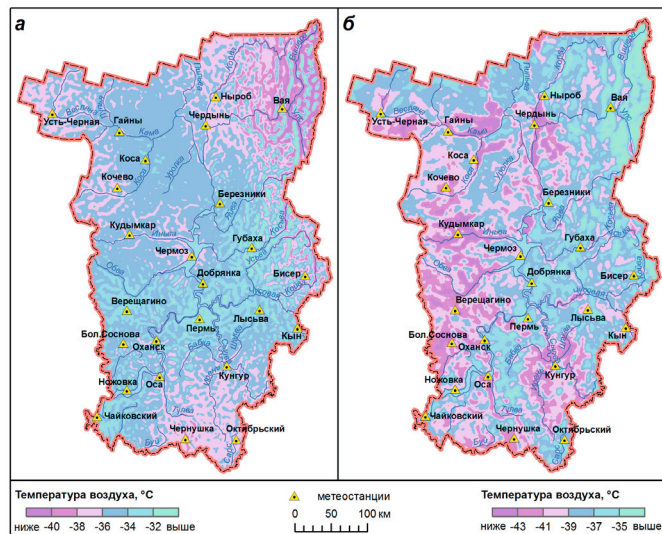


Рис. 3. Сопоставление среднегодового минимума температуры (а) и температуры земной поверхности, определённой по данным спутниковых измерений Terra/Aqua MODIS за 28.12.2002 г. (б)

штабе построенных карт (в данном случае, это влияние водохранилищ и городского острова тепла).

В целом повторяемость сильной жары на территории Пермского края уменьшается в направлении с юго-запада на северо-восток, что объясняется, во-первых, влиянием широтной зональности, а во-вторых, увеличением абсолютной высоты на территории Пермского края в том же направлении. Кроме того, повторяемость сильной жары существенно снижается на возвышенностях (Тулвинской, Уфимском плато, Кондасских увалах и др.). Среднегодовой максимум температуры воздуха здесь на 1–2° ниже, чем на прилегающих низменностях (рис. 4).

Заключение

Предложенная методика позволяет на основе регрессионного анализа и применения ГИС-технологий выявить зависимости режимных характеристик опасных метеорологических явлений от свойств подстилающей поверхности. На основе данной методики впервые построены карты повторяемости и интенсивности опасных явлений погоды для территории Пермского края, по которым можно объективно

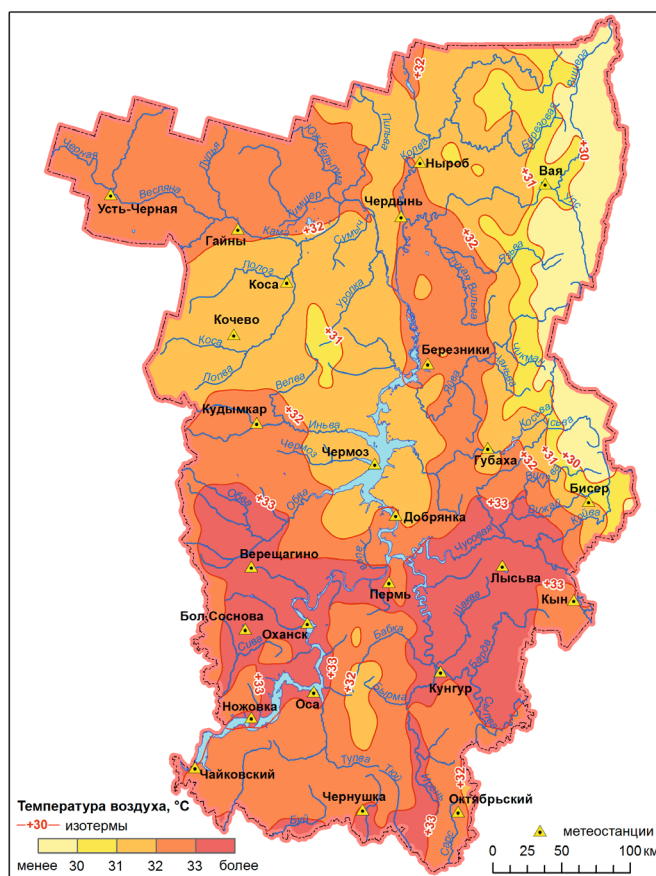


Рис. 4. Среднегодовой максимум температуры воздуха

выявить зоны повышенного риска их возникновения. С применением аналогичного подхода, могут быть учтены зависимости не только от морфометрических характеристик рельефа, но и от других свойств подстилающей поверхности, а именно лесистости, наличия крупных водоёмов и городских островов тепла.

Важным преимуществом данной методики являются возможность реализации на любой территории со сходными природными условиями. Она может применяться для оценки повторяемости и возможной интенсивности опасных явлений погоды на территориях, по которым отсутствуют данные метеонаблюдений. Также большое значение в условиях современного изменения климата имеет возможность автоматического обновления карт, по мере обновления исходной информации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-45-590056 п-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации* / Под ред. С. К. Шойгу. – М.: ДИК, 2005. – 270 с.
2. Калинин Н. А., Фрик Л. В., Смирнова А. А. Исследование влияния рельефа Пермского края на распределение полей осадков // Географический вестник. – 2008. – № 2. – С. 187–195.
3. Панфутова Ю. А. Опасные метеорологические явления на равнинной территории России и риски, создаваемые ими: Автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. геогр. наук. – СПб.: ГУ «Государственная геофизическая обсерватория», 2008. – 21 с.
4. Шумов В. А. Методы анализа пространственной изменчивости снегов запасов // Изв. РАН. Серия географическая. – 1998. – № 1. – С. 122–132.
5. Chung U., Seo H. H., Hwang K. H., Hwang B. S., Choi J., Lee J. T. and Yun J. I. Minimum temperature mapping over complex terrain by estimating cold air accumulation potential // Agricultural and Forest Meteorology. – 2006. – V. 137. – P. 15–24. DOI: 10.1016/j.agrformet.2005.12.011.
6. Moral F. J. Comparison of different geostatistical approaches to map climate variables: Application to precipitation // International Journal of Climatology. – 2010. – V. 30. – P. 620–631. DOI: 10.1002/joc.1913.
7. Ninzerola M., Pons X., Roure J. M. A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques // International Journal of Climatology. – 2000. – V. 20. – P. 1823–1841. DOI: 10.1002/1097-0088(20001130)20:14<1823::AID-JOC566>3.0.CO;2-B.
8. Vicente-Serrano S. M., Saz-Sánchez M. A. and Cuadrat J. M. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain) // Climate Research. – 2003. – V. 24. – P. 161–180.
9. Weisse A. K. and Bois Ph. A comparison of methods for mapping statistical characteristics of heavy rainfall in the French Alps: The use of daily information // Hydrological Sciences Journal. – 2002. – V. 47. – P. 739–752.
10. Zheng X., Zhu J. and Yan Q. Monthly air temperatures over northern China estimated by integrating MODIS data with GIS techniques // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 2013. – V. 52. – P. 1987–2000. DOI: 10.1175/JAMC-D-12-0264.1.

Summary

The article describes a method of mapping climatic parameters (i. e. frequency and intensity) of severe weather events, based on the interpolation of weather station data. We applied regression-based interpolation, using some geographical variables (altitude, slope angle and curvature) for modeling their spatial distribution. Statistically significant correlations between geographical and climatic variables were selected based on regression analysis. They have been used to create a maps of frequency, average and maximum intensity of severe weather events for Perm region (160 600 km²). The proposed method allows to create more accurate and detailed maps of spatial distribution of severe weather events than traditional deterministic and geostatistical interpolation methods. The reliability of the results confirmed by a weather station observations and comparisons with MODIS satellite images thematic products. Significant advantage of proposed method is also its applicability to the risk assessment of severe weather events in ungauged site, or in ungauged areas. ■