Оценка повторяемости конвективных опасных явлений погоды с применением данных дистанционного зондирования (на примере территории Пермского края)

Р.К. Абдуллин¹, А.Н. Шихов¹

Пермский государственный национальный исследовательский университет Пермь, 614990, Россия E-mail: gis@psu.ru

Рассмотрены различные подходы к оценке повторяемости локальных опасных явлений погоды (ОЯП), связанных с развитием конвекции, с применением многолетних данных дистанционного зондирования. Сопоставлены результаты прямой (по фактическим данным наблюдений) и косвенной (по данным дистанционного зондирования) оценки частоты возникновения конвективных явлений на примере территории Пермского края. Оценка повторяемости прохождения мезомасштабных конвективных систем (МКС) выполнена на основе многолетнего ряда спутниковых наблюдений Terra/Aqua MODIS, а оценка повторяемости гроз — по данным сети грозопеленгации World Wide Lightning Location Network (WWLLN). Показано, что наибольшей повторяемостью конвективных явлений характеризуются юго-западные и северо-западные районы края, а наименьшей — горная северо-восточная часть территории.

Пространственное распределение повторяемости прохождения MKC, определенное по данным MODIS, и повторяемости гроз по данным WWLLN характеризуется высокой степенью подобия. Это показывает объективность полученных оценок по данным дистанционного зондирования. В то же время результаты оценки повторяемости конвективных ОЯП на основе фактических данных наблюдений существенно отличаются от них. Это может быть обусловлено локальным характером конвективных явлений и, как следствие, неполнотой исходных данных о зафиксированных случаях в условиях низкой плотности населения и наблюдательной сети.

Ключевые слова: конвективные опасные явления погоды, повторяемость, мезомасштабные конвективные системы, данные MODIS, данные WWLLN

Одобрена к печати: 15.09.2017 DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-7-308-318

Введение

Метеорологические явления, связанные с развитием глубокой конвекции (сильные ливни, шквалы, крупный град и смерчи) ежегодно наносят значительный материальный ущерб и приводят к человеческим жертвам. На фоне происходящего глобального изменения климата возможно увеличение их повторяемости и интенсивности (Diffenbaugh et al., 2013; Meredith et al., 2015). В связи с этим изучение современной климатологии конвективных явлений на различных пространственных масштабах представляет огромный интерес. Этому способствует также появление новых источников данных, таких как многолетние ряды наблюдений с геостационарных метеорологических спутников, сетей грозопеленгации и метеорологических радиолокаторов.

Локальный и кратковременный характер конвективных опасных явлений погоды (ОЯП) не позволяет объективно оценить их пространственно-временное распределение на основе наземных наблюдений даже в районах с высокой плотностью сети метеостанций, таких как территория Европы (Punge et al., 2014). В настоящее время предложено несколько подходов к изучению современной климатологии конвективных ОЯП с высоким пространственно-временным разрешением.

Изучение современной климатологии конвективных ОЯП по многолетним данным допплеровских метеорологических радиолокаторов (radar-based climatology)

Высокое пространственное И временное разрешение данных допплеметеорологических радиолокаторов (ДМРЛ) ровских и. как следствие, высокая достоверность получаемых оценок являются основным преимуществом данного подхода. Ряд характеристик конвективных ОЯП (например, возможный диаметр града) могут дистанционно оцениваться только по данным ДМРЛ. Так, в работе (Nisi et al., 2016) представлены результаты исследования пространственно-временного распределения случаев крупного града на территории Швейцарии за период с 2002 по 2014 г., полученные на основе данных допплеровских радиолокаторов С-диапазона, в том числе оценки среднегодового числа дней с градом различного диаметра. Аналогичное исследование было проведено для территории США за период с 2007 по 2010 г. (Cintineo et al., 2012). В то же время для большей части территории России многолетний ряд данных ДМРЛ в настоящий момент недоступен, что исключает применение данного подхода для изучения климатологии конвективных явлений.

Изучение современной климатологии конвективных ОЯП по спутниковым данным (satellite-based climatology)

При отсутствии или недоступности данных ДМРЛ для исследования современной климатологии конвективных ОЯП широко применяются спутниковые данные. Все методы изучения климатологии конвективных ОЯП по данным с геостационарных и полярно-орбитальных спутников (satellite-based climatology) основаны на анализе многолетних рядов наблюдений за мезомасштабными конвективными системами (МКС), вызывающими эти явления, и оценке их характеристик.

Из параметров МКС, оцениваемых по спутниковым данным в тепловом диапазоне, наибольший интерес представляет температура верхней границы облаков (Твго). Экстремально низкая Твго, как правило, указывает на участки с максимальной интенсивностью конвекции. Выявление зон интенсивной конвекции по спутниковым данным производится на основе идентификации так называемых overshooting convective cloud tops (OTs) — вершин кучево-дождевых облаков, пробивающих тропопаузу и распространяющихся в стратосферу. По данным (Punge et al., 2014), с ними связано более 50% всех случаев крупного града и сопутствующих ОЯП. Автоматизированная идентификация ОТs осуществляется на основе данных с геостационарных спутников по алгоритму, предложенному в работе (Bedka et al., 2011). Использование этого алгоритма позволило, в частности, произвести объективный анализ вероятности выпадения крупного града на территории Европы (Punge et al., 2014). Основное пороговое значение Твго для идентификации зон активной конвекции в данной работе было принято равным 217,65 К ($-55,5^{\circ}$ С), дополнительно использовался анализ значений в соседних пикселах. Помимо снимков в тепловом диапазоне, для изучения пространственно-временного распределения конвективных ОЯП используются спутниковые наблюдения в микроволновом диапазоне. В работе (Ferraro et al., 2015) представлен алгоритм идентификации конвективных ячеек с градом по данным микроволновой съемки со спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) прибором AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit). На их основе создана климатология случаев выпадения града за 2000–2011 гг., включая оценку общего числа случаев, межгодовой, сезонной и суточной изменчивости. Однако точность полученных оценок существенно ниже, чем по радиолокационным данным.

Многолетние ряды наблюдений с геостационарных спутников доступны на большую часть Земного шара за исключением северных регионов, для которых они имеют слишком низкое разрешение. В этом случае для оценки повторяемости возникновения МКС и связанных с ними конвективных явлений могут быть использованы данные с полярно-орбитальных спутников NOAA, а также Terra и Aqua (прибор Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS). Последние отличаются более высокой детальностью, но сравнительно низкой повторяемостью съемки.

Помимо спутниковых и радиолокационных наблюдений, для изучения современной климатологии конвективных явлений широко используются данные сетей грозопеленгации. Наиболее известная система регистрации грозовых разрядов World Wide Lightning Location Network (WWLLN) действует с 2004 г. На основе данных WWLLN создана современная климатология гроз в глобальном масштабе (Virts et al., 2013), также они могут использоваться для оценки частоты возникновения ОЯП в умеренных широтах.

Таким образом, источники информации о пространственно-временном распределении конвективных ОЯП весьма разнообразны. Однако сопоставление полученных результатов между собой представляет определенные сложности вследствие разных периодов наблюдений и необходимости сравнения различных параметров. Для получения наиболее полной и объективной климатологии конвективных ОЯП может использоваться их комбинирование. Например, в работе (Jurković et al., 2015) для изучения пространственного распределения случаев крупного града на территории Хорватии комбинировались данные спутниковых наблюдений и сетей грозопеленгации.

В России исследования климатологии конвективных ОЯП на основе многолетних рядов данных дистанционных наблюдений ранее не проводились. Из-за низкой плотности наблюдательной сети эта задача представляется весьма актуальной. Целью настоящей работы является получение наиболее объективной оценки повторяемости конвективных ОЯП на региональном уровне (на примере территории Пермского края) на основе комплексного анализа данных наземных и дистанционных наблюдений. В пределах исследуемой территории (160,6 тыс. км²) действует 25 метеостанций, что недостаточно для фиксации большинства случаев локальных конвективных ОЯП. Большинство из них отмечается только по факту нанесенного ущерба. Также большая часть территории края не входит в зону покрытия наблюдениями ДМРЛ, что исключает их использование для изучения повторяемости конвективных ОЯП.

Исходные данные

Исследование повторяемости конвективных ОЯП на территории Пермского края проведено за 10-летний период (с 2007 по 2016 г.). Использованы следующие источники данных:

Данные наблюдательной сети Пермского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Пермского ЦГМС) о случаях конвективных ОЯП (сильных ливней с количеством осадков ≥ 30 мм за период ≤ 1 ч, крупного града диаметром ≥ 20 мм и шквалов со скоростью ветра 24 м/с и более).

Отчеты Пермского ЦГМС о случаях конвективных ОЯП за 2001–2014 гг., выявленных по факту нанесенного ущерба. Сведения обо всех этих случаях представлены также в Базе данных ОЯП Пермского края (http://map.psu.ru/search.aspx).

Многолетний ряд спутниковых снимков Terra/Aqua MODIS на исследуемую территорию за те дни, когда по данным метеостанций были зафиксированы грозы. Выбор снимков Terra/Aqua MODIS обусловлен тем, что данные с европейских геостационарных спутников Meteosat для изучаемой территории имеют слишком низкое разрешение (поскольку Пермский край расположен на краю зоны их обзора). Низкая частота съемки со спутников Terra/ Aqua MODIS приводит к пропуску значительной части случаев появления MKC, однако однородность данных и наличие многолетнего ряда позволяют считать их репрезентативными и использовать для изучения повторяемости.

Данные о количестве грозовых разрядов в год на 1 км² территории, полученные на основе сети грозопеленгации WWLLN за 2008–2011 гг. (Virts et al., 2013).

Данные о ветровальных нарушениях лесного покрова, вызванных шквалами и смерчами на территории Пермского края за 2007—2016 гг., полученные на основе результатов проекта Global Forest Change (Hansen et al., 2013), а также анализа снимков Landsat с пространственным разрешением 30 м. В настоящем исследовании был использован обновленный векторный слой ветровалов на территории Пермского края, описание которого было приведено в работе (Шихов, 2014). Известно, что появление и характер ветровальных нарушений зависит не только от интенсивности ветрового воздействия, но и от особенностей лесных насаждений, прежде всего породного состава и возраста (Петухов, 2016). Однако многолетний ряд данных о ветровалах представляет собой важный источник информации о случаях особо сильных шквалов и смерчей на изучаемой территории, отличающейся высокой лесистостью (более 70%) и низкой плотностью населения.

Оценка пространственного распределения конвективных ОЯП

На основе имеющейся исходной информации возможна прямая и косвенная оценка пространственного распределения конвективных ОЯП. Для получения прямой оценки необходимо использовать все данные о подтвержденных случаях ОЯП. Оптимальным способом картографирования в этом случая является расчет плотности пространственного распределения (входные данные представляются как точечные). Косвенная оценка основана на использовании многолетнего ряда данных дистанционного зондирования (спутниковой съемки или сетей грозопеленгации) и позволяет получить данные о повторяемости возникновения конвективных облачных систем или гроз. При этом предполагается, что частота возникновения ОЯП будет пропорциональна полученным характеристикам.

Прямая оценка повторяемости конвективных ОЯП получена на основе совокупности сведений о случаях, зафиксированных наблюдательной сетью и выявленных по данным об ущербе (включая анализ ветровалов в лесных массивах). Места наблюдения явлений представлены в виде точек с указанием числа зафиксированных случаев за рассматриваемый период. Всего получены сведения о 40 случаях шквалов, 6 случаях смерчей и 12 случаях крупного града, которые произошли в Пермском крае в период с 2007 по 2016 г. Расчет плотности точечных объектов производился с помощью алгоритма плотности ядер (Kernel Density) модуля Spatial Analyst программного продукта ArcGIS версии 10.Х. Аналогичная методика, основанная на оценке плотности точечных объектов, используется для картографирования пространственного распределения случаев смерчей на территории США (Boruff et al., 2003) и Европы (Groenemeijer, Kuhne, 2014).

Известно, что число зафиксированных случаев конвективных ОЯП может определяться не только их фактической повторяемостью, но и плотностью сети наблюдений на исследуемой территории (чем ниже плотность сети наблюдений, тем больше вероятность пропуска случая явления), а также плотностью населения. В связи с этим после расчета плотности пространственного распределения случаев конвективных ОЯП была проведена операция нормирования на максимальную по территории региона плотность наблюдательной сети (2,55 пунктов/1000 км²).

Полученная карта плотности пространственного распределения ОЯП конвективного характера представлена на *рис. 1.* Локальные максимумы частоты их возникновения выявлены в центральных (в районе г. Пермь), юго-западных и северо-западных районах. При этом максимум повторяемости в районе г. Пермь может быть обусловлен высокой плотностью населения (в связи с чем повышается доля случаев, зафиксированных на основе данных о нанесенном ущербе). Локальный максимум на северо-западе края подтверждается высокой повторяемостью массовых ветровалов, которые происходили в этом районе три раза за последние 10 лет и были вызваны как шквалами, так и смерчами. Минимальная частота возникновения конвективных ОЯП характерна для района Камского водохранилища, которое сравнительно медленно прогревается в летний период и подавляет развитие конвекции.

Недостатком описанного подхода к оценке повторяемости конвективных ОЯП является, прежде всего, разнородность исходных данных и случайный характер фиксации явлений по данным об ущербе (которые составляют почти треть от всех рассмотренных случаев). В отличие от данных об ущербе, представленных в отчетах Пермского ЦГМС, данные наблюдений метеостанций, а также данные о ветровалах, полученные на основе снимков Landsat, можно считать однородными.

Косвенная оценка повторяемости конвективных ОЯП получена на основе анализа частоты возникновения МКС с низкими значениями Твго. Анализ выполнен на основе многолетнего ряда спутниковых снимков Terra/Aqua MODIS. Снимки были получены с web-ресурсов Национального аэрокосмического агентства США (NASA), подбор их осуществлялся на основе данных о случаях гроз, зафиксированных метеостанциями Пермского края. Всего было обработано 296 снимков Terra/Aqua MODIS за период 2007–2016 гг. Для выделения МКС, способных вызвать ОЯП, использовался пороговый критерий радиояркостной температуры в тепловом ($\lambda = 11$ мкм) канале, принятый равным –52°С (221 К). Данный критерий был предложен в работе (Ленская, 2007) как пороговое значение при выделении МКС с возможностью развития ОЯП.



Рис. 1. Плотность пространственного распределения конвективных ОЯП за 2007-2016 гг.

Для расчета Твго применялся алгоритм Generalized split-window LST, описанный в документе ATBD-MOD11 (Wan, 1999) и реализованный в ПО Scanex Image Processor (ScanEx..., 2013). В качестве входных параметров алгоритма ATBD-MOD11 используются значения излучения, регистрируемого в тепловом диапазоне (в каналах 31 и 32), пересчитанные в соответствующие значения температур; значения широты для начального приближения температуры и влажности воздуха; зенитный угол сенсора; значения наличия облачности и воды для исключения соответствующих им пикселей. При коррекции температуры для всех пикселей используется среднее значение излучения (за исключением пикселей, определенных как снежный покров, для них используются свои собственные значения). При расчете предварительно была выключена маска облачности, что позволило вычислять Твго.

Полученные растры Твго обрабатывались в программном пакете ArcGIS. Средствами растровой алгебры были извлечены ячейки, соответствующие конвективной облачности и имеющие температуру ниже -52°C (221 K). Затем производилось суммирование полученных бинарных растров и сглаживание полученного результата путем осреднения в скользящем окне. Для автоматизации процессов обработки был разработан скрипт на языке Python. Полученная карта частоты возникновения и прохождения МКС приведена на *puc. 2a*.



Рис. 2. Оценка повторяемости конвективных ОЯП косвенными методами: а) частота прохождения МКС по спутниковым данным Terra/Aqua MODIS за 2007—2016 гг., б) повторяемость гроз по данным WWLLN за 2008—2011 гг.

На созданной карте выделяется несколько локальных максимумов частоты прохождения МКС (более 20 случаев/10 лет). Они расположены преимущественно в западной половине рассматриваемой территории. Основной максимум (25 случаев/10 лет) соответствует западному склону Тулвинской возвышенности (юго-западнее г. Пермь). Также сравнительно высокой повторяемостью прохождения МКС (до 20 случаев/10 лет) характеризуется западный склон Среднего Урала. Здесь развитию интенсивной конвекции способствует пересеченный рельеф, что отмечалось еще в работе (Шкляев, 1990). Высокая повторяемость (до 20 случаев/10 лет) характерна и для северо-западных районов края, что может быть обусловлено залесенностью и заболоченностью подстилающей поверхности.

Северо-восточным районам Пермского края соответствует ярко выраженный минимум повторяемости прохождения МКС (менее 8 случаев/10 лет). Это может быть обусловлено большой продолжительностью залегания снежного покрова в горной северо-восточной части территории и сравнительно низким фоном температуры в летний период. В результате сезон развития активной конвекции на северо-востоке края существенно сокращается в сравнении с более южными районами.

Полученная по данным MODIS оценка была сопоставлена с глобальной картой частоты молниевых разрядов, полученной по данным сети грозопеленгации WWLLN (с пространственным разрешением 1°) за 2008–2011 гг. (Virts et al., 2013). По данным WWLLN, максимальная частота грозовых разрядов (более 0,15 на 1 км² за год) наблюдается в западной части Пермского края, а также на крайнем востоке территории, а минимальная (0,08 на 1 км² за год) — в горной северо-восточной части (*puc. 26*). Достаточно высокая частота грозовых разрядов (от 0,12 до 0,15 на 1 км² за год) характерна для северо-западной части края и для восточного склона Среднего Урала.

Для оценки степени подобия результатов прямой и косвенной оценки повторяемости конвективных ОЯП была построена корреляционная матрица (*табл. 1*). Коэффициенты линейной корреляции (Пирсона) и ранговой корреляции (Спирмена) были рассчитаны по данным, извлеченным в ячейки регулярной сетки размером 100 км².

	Частота прохождения МКС (по данным MODIS)	Частота молниевых разрядов (по данным WWLLN)	Плотность случаев конвективных ОЯП
Частота прохождения МКС (по данным MODIS)	1,0/1,0	0,61/0,76	0,29/0,29
Частота молниевых разрядов (по данным WWLLN)	0,61/0,76	1,0/1,0	0,38/0,35
Плотность зафиксирован- ных случаев конвективных ОЯП	0,29/0,29	0,38/0,35	1,0/1,0

Таблица 1. Корреляционная матрица между результатами расчета частоты конвективных явлений различными способами (в числителе и в знаменателе — коэффициенты линейной корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмена соответственно)

Как следует из *табл. 1*, полученная по спутниковым данным MODIS оценка повторяемости прохождения MKC имеет высокую степень подобия с данными о частоте молниевых разрядов WWLLN. Полученные коэффициенты корреляции являются высокими и статистически значимыми. Таким образом, можно утверждать, что наибольшей повторяемостью конвективных явлений характеризуются районы, расположенные к западу, юго-западу и северо-западу от Перми, а минимум повторяемости соответствует северо-восточным районам края.

В то же время результаты оценки повторяемости конвективных ОЯП прямыми (*puc. 1*) и косвенными методами (*puc. 2a* и *26*) характеризуются сравнительно слабой степенью подобия, на что указывают низкие значения коэффициентов корреляции. По всей видимости, это обусловлено неполнотой данных, использованных для прямой оценки. Любой набор данных о локальных конвективных явлениях, полученный на основе наблюдательной сети, наблюдений очевидцев или анализа сведения об ущербе, является неполным. В связи с этим более объективным источником информации о повторяемости конвективных явлений на территории Пермского края можно считать спутниковые наблюдения и данные сетей грозопеленгации.

Заключение

В результате проведенного исследования впервые сопоставлены различные методы оценки повторяемости локальных конвективных явлений погоды на региональном уровне (на примере территории Пермского края). Получена прямая (по фактическим данным) и косвенная (по данным дистанционного зондирования) оценка частоты возникновения конвективных ОЯП. Выявлены области повышенной повторяемости возникновения самих явлений, а также МКС и гроз. Наибольшей повторяемостью характеризуются юго-западные и северо-западные районы края, а наименьшей — северо-восточная часть территории. Пространственное распределение повторяемости прохождения МКС, определенное по данным MODIS, в целом соответствуют данным о частоте молниевых разрядов сети грозопеленгации WWLLN. В то же время результаты прямой и косвенной оценки повторяемости конвективных ОЯП характеризуются сравнительно слабой степенью подобия, что обусловлено неполнотой исходных данных о случаях ОЯП и их зависимостью от плотности населения. Таким образом, дистанционные наблюдения с высоким пространственным и временным разрешением (спутниковая съемка, данные ДМРЛ и сетей грозопеленгации) являются более объективным источником информации, и в перспективе именно они могут стать основой для изучения современной климатологии локальных конвективных явлений.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-590056 р-а) и гранта Президента РФ № МК-801.2017-5.

Литература

- Ленская О.Ю. Методические вопросы использования спутниковой и радиолокационной информации в 1. мезомасштабном прогнозе (на примере опасных явлений погоды в Москве 24 июля 2001 г.) // Вестник Челябинского ун-та. 2007. № 6. С. 66-79.
- 2. Петухов И.Н. Роль массовых ветровалов в формировании лесного покрова в подзоне южной тайги (Костромская область). Дисс. канд. биол. наук. Кострома. 2016. 150 с.
- Шихов А.Н. Оценка последствий стихийных природных явлений для лесных ресурсов Пермского края по 3 многолетним рядам данных космической съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 21–30.
- Шкляев В.А. Особенности распределения конвективных явлений на Урале // Вопросы прогноза погоды, 4 климата и циркуляции атмосферы: межвуз. сб. науч. трудов. Пермь. 1990. С. 76-86.
- Bedka K.M. Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI infrared brightness temperatures and their 5 relationship to severe weather over Europe // Atmospheric Research. 2011. Vol. 99 (2). P. 175–189. Boruff B.J., Easoz J.A., Jones S.D., Landry H.R., Mitchem J.D., Cutter S.L. Tornado hazards in the United States
- 6 // Climate Research. 2003. Vol. 24. P. 103-117.
- *Cintineo J.L., Smith T.M., Lakshmanan V., Brooks H.E., Ortega K.L.* An objective high-resolution hail climatology of the contiguous United States // Weather and Forecasting. 2012. Vol. 27 (5). P. 1235–1248. 7
- Diffenbaugh N.S., Scherer M., Trapp R.J. Robust increases in severe thunderstorm environments in response to 8. greenhouse forcing // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2013. Vol. 110 (41). P. 16361-16366.
- 9. Ferraro R., Beauchamp J., Cecil D., Heymsfield G. A prototype hail detection algorithm and hail climatology developed with the advanced microwave sounding unit (AMSU) // Atmospheric Research. 2015. Vol. 163. P. 24-35
- 10. Groenemeijer P., Kuhne T. A climatology of tornadoes in Europe: results from the European Severe Weather
- Brocheneger F., Rume F. & Chinadolgy of Ornadocs in Europe. Testils from the European Severe Weather Database // Monthly Weather Review. 2014. Vol. 142. P. 4775–4790.
 Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina 1.A., Thau D., Stehman S.V. Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chin L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // SCIENCE. 2013. Vol. 342. P. 850–853.
- 12. Jurković P.M., Mahović N.S., Počakal D. Lightning, overshooting top and hail characteristics for strong convective storms in Central Europe // Atmospheric Research. 2015. Vol. 161-162. P. 153-168.
- 13. Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.V. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme // Nature Geoscience. 2015. Vol. 8 (8). P. 615-619.
- 14. Nisi L., Martius O., Hering A., Kunz M., Germann U. Spatial and temporal distribution of hailstorms in the Alpine region: A long-term, high resolution, radar-based analysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2016. Vol. 142 (697). P. 1590-1604.
- 15. Punge H.J., Bedka K.M., Kunz M., Werner A. A new physically based stochastic event catalog for hail in Europe // Natural Hazards. 2014. Vol. 73. P. 1625–1645.
- 16. ScanEx Image Processor v.4.0. Программа обработки данных дистанционного зондирования Земли. М., 2013. 346 c.
- 17. Virts K.S., Wallace J.M., Hutchins M.L., Holzworth R.H. Highlights of a new ground-based, hourly global lightning climatology // Bulletin of the American Meteorological Society. 2013. Vol. 94 (9). P. 1381-1391.
- 18. Wan Z. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD) Version 3.3. Institute for Computational Earth System Science, University of California, Santa Barbara. 1999. 75 p.

Estimation of the frequency of hazardous convective weather events using remote sensing data (by the example of Perm Region)

R.K. Abdullin, A.N. Shikhov

Perm State University, Perm 614990, Russia *E-mail: gis@psu.ru*

The article describes different approaches to estimating the frequency of local hazardous convective weather events, using long-term remote sensing data. The results of direct estimate (using ground-based observation data and damage reports) and indirect estimate (from remote sensing data) of the frequency of hazardous weather events are compared by the example of the Perm Region. A long-term series of Terra/Aqua MODIS satellite images were used to estimate the repeatability of mesoscale convective systems occurrence. The estimation of the thunderstorms frequency was performed according to the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) data. It is shown that the southwestern and northwestern parts of the area are characterized by the highest frequency of convective weather phenomena, and the minimum frequency corresponds to the northeast of the region. The spatial distribution of mesoscale convective systems, estimated by the MODIS data, and thunderstorms (according to WWLLN data) is characterized by a high degree of similarity. This shows the objectivity of the obtained estimates from remote sensing data. At the same time, the frequency of hazardous convective weather events, estimated using ground-based observation data and damage reports, is significantly different from them. This may be due to the data incompleteness on reported local convective phenomena in conditions of low population density and sparse observational network.

Keywords: hazardous convective weather events, frequency, mesoscale convective systems, MODIS data, WWLLN data

> Accepted: 15.09.2017 DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-7-308-318

References

- Lenskaya O.Yu., Metodicheskie voprosy ispol'zovaniya sputnikovoi i radiolokatsionnoi informatsii v me-1. zomasshtabnom prognoze (na primere opasnykh yavlenii pogody v Moskve 24 iyulya 2001 g.) (Methodical issues of the use of satellite and radar data in the mesoscale forecast (by the example of dangerous weather phenomena in Moscow on July 24, 2001)), Vestnik Chelyabinskogo un-ta, 2007, No. 6, pp. 66–79. Petukhov I.N., Rol' massovykh vetrovalov v formirovanii lesnogo pokrova v podzone yuzhnoi taigi (Kostromskaya
- 2 oblast'): Diss. kand. biol. nauk (The role of large forest windfalls disturbances in the formation of forest cover in the subzone of the southern taiga (Kostroma Region). Cand. biol. sci. thesis), Kostroma, 2016, 150 p.
- Shikhov A.N. Otsenka posledstvii stikhiinykh prirodnykh yavlenii dlya lesnykh resursov Permskogo kraya po 3. mnogoletnim ryadam dannykh kosmicheskoi s"emki (Estimation of forest damage from natural disasters in Perm region using the long-term series of space imagery), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 21–30.
- Shklyaev V.A., Osobennosti raspredeleniya konvektivnykh yavlenii na Urale (Features of distribution of convective 4 phenomena in the Urals), Voprosy prognoza pogody, klimata i tsirkulyatsii atmosfery: mezhvuz. sb. nauch. Trudov, Perm', 1990, pp. 76-86.
- Bedka K.M., Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI infrared brightness temperatures and their 5. relationship to severe weather over Europe, Atmospheric Research, 2011, Vol. 99 (2), pp. 175–189.
- Boruff B.J., Easoz J.A., Jones S.D., Landry H.R., Mitchem J.D., Cutter S.L., Tornado hazards in the United States, *Climate Research*, 2003, Vol. 24, pp. 103–117. Cintineo J.L., Smith T.M., Lakshmanan V., Brooks H.E., Ortega. K.L., An objective high-resolution hail 6.
- 7. climatology of the contiguous United States, Weather and Forecasting, 2012, Vol. 27 (5), pp. 1235–1248.
- Diffenbaugh N.S., Scherer M., Trapp R.J., Robust increases in severe thunderstorm environments in response 8. to greenhouse forcing, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, Vol. 110 (41), pp. 16361-16366.
- 9. Ferraro R., Beauchamp J., Cecil D., Heymsfield G., A prototype hail detection algorithm and hail climatology developed with the advanced microwave sounding unit (AMSU), Atmospheric Research, 2015, Vol. 163, pp. 24–35.
- 10 Groenemeijer P., Kuhne T., A climatology of tornadoes in Europe: results from the European Severe Weather Database, *Monthly Weather Review*, 2014, Vol. 142, pp. 4775–4790. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina 1.A., Thau D., Stehman S.V.
- 11 Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chin L., Justice C.O., Townshend J.R.G., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, Science, 2013, Vol. 342, pp. 850-853.
- 12. Jurković P.M., Mahović N.S., Počakal D., Lightning, overshooting top and hail characteristics for strong convective storms in Central Europe, Atmospheric Research, 2015, Vol. 161–162, pp. 153–168.
- 13. Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D., Park W., Chernokulsky A.V., Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme, Nature Geoscience, 2015, Vol. 8 (8), pp. 615-619.
- Nisi L., Martius O., Hering A., Kunz M., Germann U., Spatial and temporal distribution of hailstorms in the 14 Alpine region: A long-term, high resolution, radar-based analysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016. Vol. 142 (697), pp. 1590–1604.
- 15. Punge H.J., Bedka K.M., Kunz M., Werner A., A new physically based stochastic event catalog for hail in Europe, Natural Hazards, 2014, Vol. 73, pp. 1625–1645. 16. ScanEx Image Processor v.4.0. Programma obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Earth Remote
- Sensing Data Processing Software), Moscow, 2013, 346 p.
- Virts K.S., Wallace J.M., Hutchins M.L., Holzworth R.H., Highlights of a new ground-based, hourly global 17 lightning climatology, Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, Vol. 94 (9), pp. 1381–1391.
- Wan Z., MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD) Version 3.3, 18 Institute for Computational Earth System Science, University of California, Santa Barbara, 1999, 75 p.