

УДК 551.506.9+551.501.8+551.509.39

Параметры долгоживущих мощных конвективных структур на Европейской территории России и сопредельных территориях и возможности унификации их прогноза

А.А. Спрыгин

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия;
Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный,
Московская обл., Россия
spralexandr@gmail.com*

В статье приводятся комплексные характеристики случаев мощных конвективных структур (штормов) различного типа с формированием опасных явлений над Европейской территорией России, а также над сопредельными территориями: Республикой Беларусь и Украиной по данным различного рода: диагностическим спутниковым и радарным, данным приземного синоптического анализа и архивным прогностическим данным глобальной модели GFS. Рассмотрены принципы разработки унифицированной технологии прогноза мощных штормов по исследуемой территории.

Ключевые слова: мезомасштабный конвективный комплекс, мезомасштабная конвективная система, суперячейка, радарные и спутниковые сигнатуры, индексы неустойчивости, глобальная прогностическая модель GFS, анализ случаев

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-21-47>

Parameters of long-lived severe convective structures in the European part of Russia and neighboring territories and the possibility to unify their forecast

A.A. Sprygin

*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia;
Roshdromet Central Aerological Observatory, Dolgoprudny,
Moscow region, Russia
spralexandr@gmail.com*

The paper provides the generalized characteristics for the cases of various types of severe convective structures (storms) accompanied by the formation of severe weather events over the European part of Russia and neighboring territories: the Republic of Belarus and Ukraine. Various kinds of data are used: diagnostic satellite and radar data, surface analysis data, and GFS global model archive data. The principles of developing a unified technology for the prediction of severe storms over the study area are considered.

Keywords: mesoscale convective complex, mesoscale convective system, supercell, radar and satellite signatures, instability indices, GFS global weather forecast model, case studies

Введение

Исследования процессов мощной организованной конвекции над определенной территорией важны для определения наиболее типовых параметров, описывающих сами конвективные структуры (штормы), и для установления наиболее благоприятных синоптических, термодинамических условий атмосферы в районе формирования данных структур и связанных с ними опасных явлений (ОЯ), что, в свою очередь, актуально для проблемы их прогноза.

Объектами исследования в представленной работе являются *мощные конвективные структуры* различных типов и масштаба, описанных в различных источниках [1, 3, 6]: *мезомасштабные конвективные системы* (МКС линейного и квази-осесимметричного типа), *мезомасштабные конвективные комплексы* (МКК) и *вихри* (МКВ), *суперячейковые* (СЯ) *кучево-дождевые облака*, определяемые по диагностическим данным и являющиеся часто генераторами комплекса опасных конвективных явлений: интенсивных гроз, крупного града, сильных ливней, шквалов, сильных порывов ветра и смерчей [6].

Тип структуры определялся по характерной форме (по спутниковым изображениям) и уточнялся (для некоторых типов) по определенным сигналам (отмечаемым по обработанным спутниковым данным и радарным данным) и другим особенностям (описанным ниже) по диагностическим данным.

Все объекты исследования являются объектами *мезомасштаба*.

Масштаб мезо- α : линейные размеры 200–2000 км – мезомасштабные конвективные системы, в т. ч. линейного типа (МКС ЛТ), мезомасштабные конвективные комплексы, мезомасштабные конвективные вихри.

Масштаб мезо- β : линейные размеры 20–200 км – суперячейковые облака.

Краткое описание исследуемых типов структур

Мезомасштабные конвективные комплексы (МКК) – устойчивые, наиболее долгоживущие, осесимметричные (имеющие четкую и устойчивую во времени квази-круглую либо квази-овальную форму по спутниковым изображениям) конвективные системы масштаба мезо- α . По радарным данным часто имеют две выраженных области – конвективный регион в области переднего фронта системы и слоистообразный регион в тыловой части [3, 6] Примеры таких структур (на спутниковых изображениях) показаны на рис. 1.

Мезомасштабные конвективные системы (МКС) – скопления (масштаба мезо- α) мощных кучево-дождевых облаков (Cb), единая система (часто с образованием единой «наковальни» (anvil cloud) над ней в зрелой и поздней стадии развития) с чередованием в течении жизненного цикла развития в системе доминирующих конвективных штормов. Особенности

строения и динамики таких систем хорошо описаны в [1]. Примеры спутниковых изображений показаны на рис. 2. Основными отличиями МКС квази-осесимметричного типа от МКК являются:

- менее определенная форма;
- отсутствие четкого разделения на конвективный и слоистообразный регион по радарным данным (что присуще МКК);

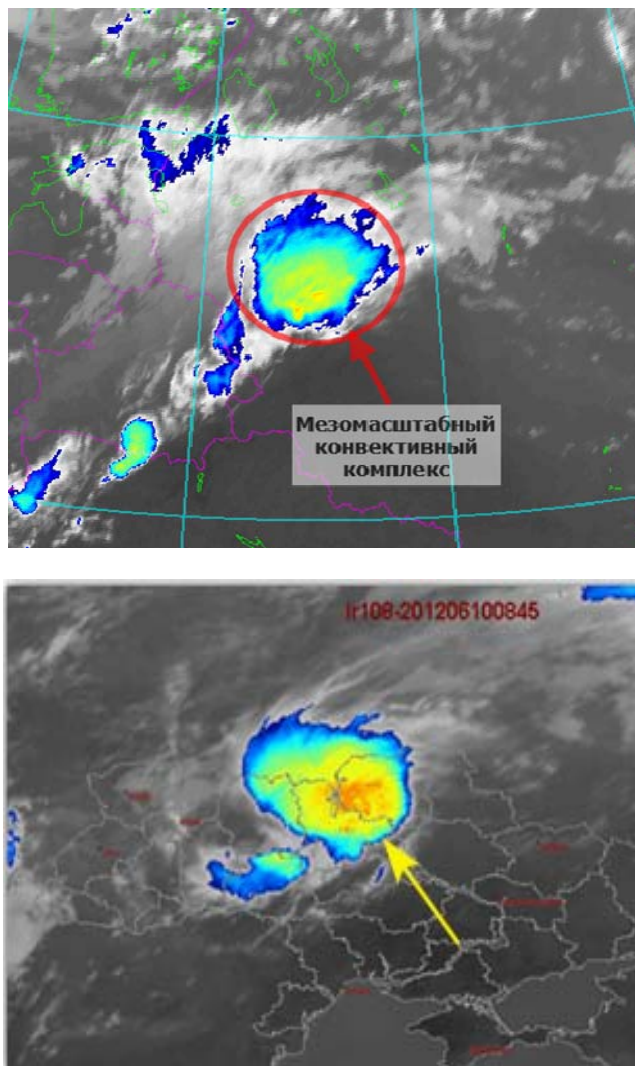


Рис. 1. Примеры изображений мезомасштабных конвективных комплексов (МКК) на спутниковых снимках (данные канала IR 10.8 спутников MSG).

Fig. 1. Examples of the mesoscale convective complexes (MCCs) on the satellite images (IR10.8 channel data of the MSG satellites).

– состоит из отдельных нескольких конвективных штормов, находящихся часто в разной стадии развития, один из которых в определенный период времени является доминирующим (имеет минимальную температуру верхней границы облачности (ТВГО) по спутниковым данным, максимальную высоту радиоэха (ВВГО), радарную отражаемость и площадь радиоэха по радарным данным), с чередованием этого процесса в разных частях системы в течении продолжительного жизненного цикла всей системы. При этом диагностические значения для анализа выбирались для того доминирующего шторма (путем анализа изображений в течение всего жизненного цикла всей системы), у которого они были наиболее экстремальными.

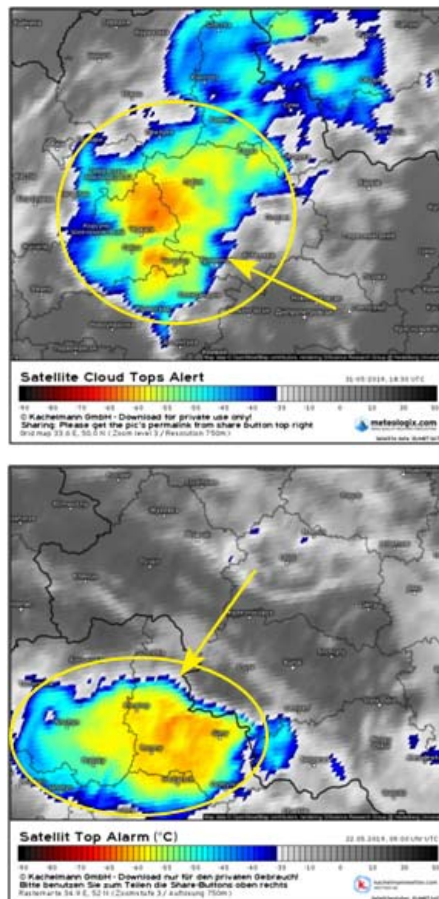


Рис. 2. Примеры мезомасштабных конвективных систем (МКС, квази-осесимметричной формы) в зрелой стадии развития на спутниковых изображениях (IR 10.8 спутники MSG).

Fig. 2. Examples of the mesoscale convective systems (MCSs, quasi-rotationally symmetric shape) in a mature stage of development on satellite images (IR 10.8 channel of MSG satellites).

Кроме вышеописанных МКС осесимметричного (или квази-осесимметричного) типа выделяются в отдельный тип структур [6] также *мезомасштабные конвективные системы линейного типа* (МКС ЛТ), которыми являются линейно-ориентированные скопления мощной конвективной облачности масштаба мезо- α : линии шквалов, некоторые холодные фронты (примеры показаны на рис. 3). Они часто состоят из линейно ориентированной цепочки отдельных конвективных штормов (см. рис. 3, справа). Диагностические значения по таким анализируемым случаям выбирались для того участка / шторма, развитие которого достигало максимального уровня (по параметрам, указанным выше для доминирующих штормов осесимметричных МКС) в течении жизненного цикла системы.

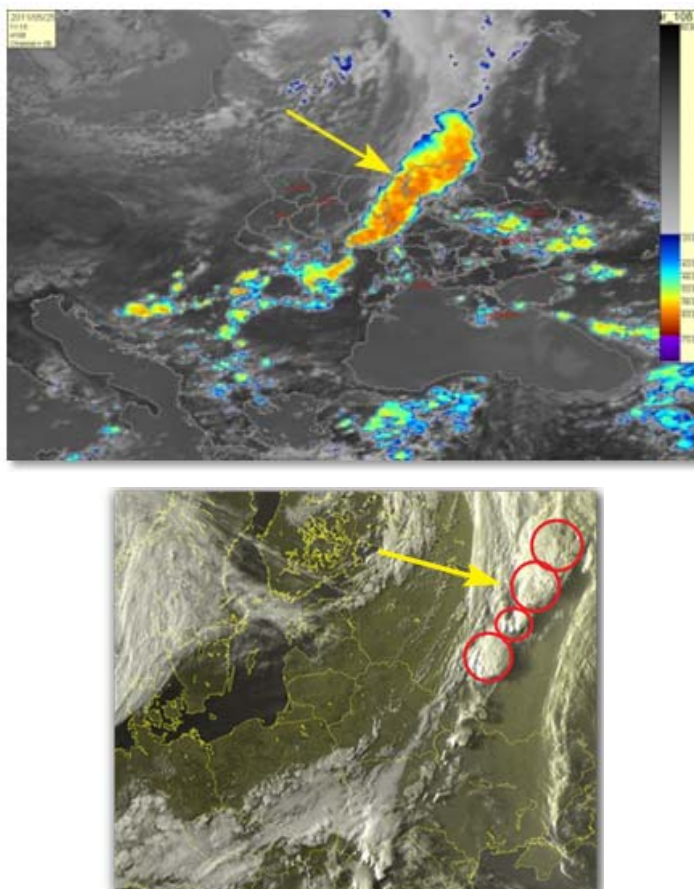


Рис. 3. Примеры мезомасштабных конвективных систем линейного типа в зрелой стадии развития на спутниковых изображениях (сверху – канал IR 10.8, снизу – визуальный канал HRV спутников MSG).

Fig. 3. Examples of the mesoscale convective systems linear type in a mature stage of development by satellite images (above – channel IR 10.8, below – HRV channel of the MSG satellites).

Редким типом мезомасштабных конвективных структур являются вихреобразные скопления кучево-дождевой облачности – *мезомасштабные конвективные вихри*, образующиеся часто на стадии распада МКК, а иногда и в условиях заполняющихся циклонов, высотных циклонов и др. Пример одного, исследуемого в данной работе случая, представлен на рис. 4.

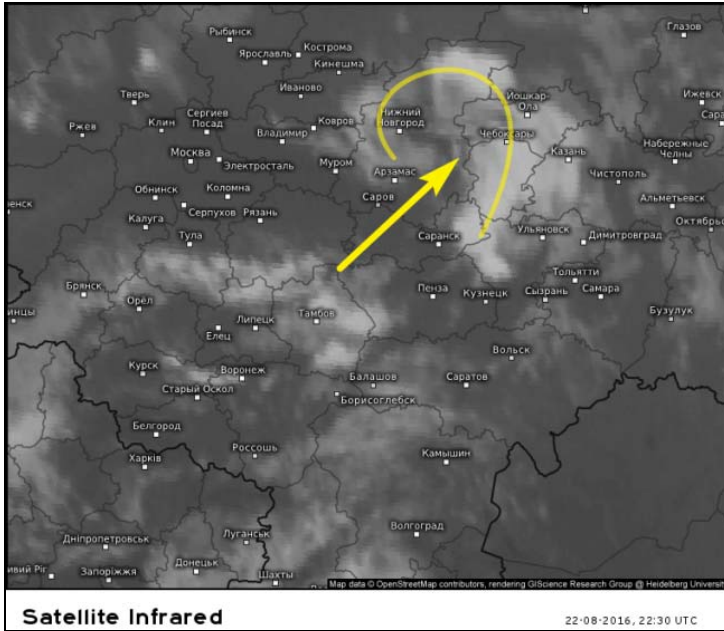


Рис. 4. Пример мезомасштабного конвективного вихря на спутниковом изображении (IR 10.8 спутник MSG).

Fig. 4. Examples of the mesoscale convective vortex on satellite image (IR 10.8 channel of MSG satellite).

Среди исследуемых долгоживущих объектов в данной работе рассматривались также и структуры (штормы) меньшего масштаба (мезо-β), а именно *суперячейковые кучево-дождевые облака*. Это мощные устойчивые конвективные штормы с характерными сигнатурами по радарным и спутниковым данным, с разделением в пространстве восходящего и нисходящего потока, наличием устойчивого вращения восходящего потока (мезоциклона) и др. свойствами, хорошо описанными, например в [6]: Пример отображения такого шторма на радарном и спутниковом изображении (с характерными сигнатурами) показан на рис. 5.

Несмотря на некоторую условность любой классификации конвективных штормов (ввиду многообразия форм и в том числе из-за нередко встречающихся переходных форм) в данном исследовании была предпринята попытка отбора наиболее характерных случаев каждого типа структуры, где форма, ее устойчивость, динамика, иные признаки позволяли

с достаточной уверенностью классифицировать тип конвективной структуры. При этом исследовалось проявление каждого рассмотренного случая таких структур в ряде характеристик: диагностических параметров по спутниковым и радарным данным, а также выявлялась синоптическая ситуация и различные параметры атмосферы (индексы неустойчивости и др.) с дальнейшим обобщением этих данных по всем случаям с помощью статистического анализа. Целью является также попытка разработки некоторой унификации технологии диагноза и прогноза мощных устойчивых структур по исследуемой территории (как с помощью применения найденных типовых параметров, так и с применением авторского экспериментального комплексного индекса прогноза мощных штормов).

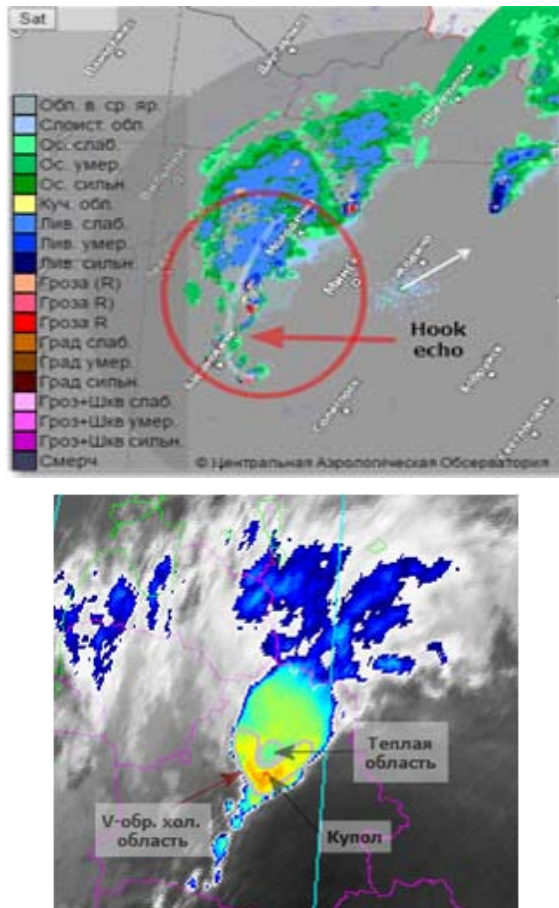


Рис. 5. Пример суперячейкового шторма на радарном (сверху; показана сигнатура *hook echo*) и спутниковом (снизу; показана сигнатура *cold-V*) изображениях.
Fig. 5. Example of the supercell storm on the radar image (above; shows the *hook echo* signature) and satellite image (below; shows the *cold-V* signature).

Материалы и методы исследования

Последовательность отбора объектов и их анализа (методика исследования) представлена ниже.

1. Выбор случаев из сообщений о событиях, фиксировавших комплексы опасных конвективных явлений (либо иногда с одним опасным явлением) по рассматриваемой территории производился из базы данных ESWD (European Severe Storm Database, <https://www.eswd.eu>), а также из других доступных источников.

2. Параллельно с этим по доступным архивным диагностическим материалам (спутниковым данным низкого разрешения, иногда радарным данным) по предварительно отобраным событиям определялся тип конвективной структуры (по вышеописанным особенностям форм структур) и отбирались объекты для последующего глубокого анализа. *Основными критериями отбора* являлись: *время существования* (от 3 ч и более, иногда до 10–12 ч) структур, *устойчивость* характерной для определенного типа структур формы – малые ее изменения в период зрелой стадии жизненного цикла структур. Всего было отобрано 30 таких случаев за 11-летний период 2009–2019 гг. Под *одним анализируемым случаем* понималось:

– формирование одного либо нескольких одновременно (в масштабе одной, либо нескольких соседних административных областей ЕТР, Беларуси, Украины) структур одного, иногда двух сопряженных в пространстве типов;

– последовательное формирование двух устойчивых структур разного типа (трансформация одного типа в другой).

3. Производилась обработка исходных спутниковых данных (*Meteosat*, визуализация файлов в исходном формате со специальной обработкой) с получением специальных отображений значений канала IR10.8 с расцветкой, согласно шкале, предложенной в [10], а также изображений визуального канала высокого разрешения HRV. По визуальному анализу полученных изображений, а также (для некоторых случаев) по доступным радарным (*МРЛ-5*, *ДМРЛ-С*) изображениям визуально устанавливалось наличие специальных *сигнатур*, таких как *Overshooting top* (куполообразные выступы над наковальной, определяемые по спутниковым изображениям, связанные с вероятным пробоем тропопаузы); *Cold-U/V/ring* – сигнатура распределения температуры верхней границы облачности (по специальному отображению канала IR10.8) определенной формы; *Hook (bow) echo* – крючкообразный (дугообразный) изгиб радиоэха и др. (более полное описание сигнатур см. далее), описанные в различных источниках [3, 5, 8–10]. Необходимо отметить, что радарные данные (в том или ином виде, различного разрешения и информативности) были доступны для 23 случаев.

4. Также по дистанционным данным определялись экстремумы таких диагностических параметров: минимальной температуры верхней границы облачности (ТВГО), максимальной высоты радиоэха (ВВГО), скорость

смещения радиозоха. Диагностические характеристики (ВВГО, ТВГО, сигнатуры) анализировались в течение всего периода жизненного цикла штормов. Под *временем существования структуры* понимался промежуток времени от стадии ее формирования до стадии распада:

а) *стадия формирования* – появление характерной устойчивой формы объекта по спутниковым данным, формирование по данным канала IR 10.8 спутников MSG замкнутой (квазикруглой либо линейно вытянутой) области с ТВГО $< -33\text{ }^{\circ}\text{C}$ (240 K) с тенденцией к понижению температуры во внутренней области;

б) *стадия максимального развития* – для штормов регистрируются min ТВГО по IR 10.8, max ВВГО по МРЛ, большинство ОЯ. Опорная стадия для исследования: по ре-прогностическим данным GFS для времени этой стадии определялись экстремумы параметров (см. ниже);

в) *стадия распада (диссипации)* – потеря структурой единства формы, рост ТВГО на всей площади структуры, уменьшение ВВГО, ОЯ отмечаются редко.

Далее иногда уточнялся тип конвективной структуры по наличию определенных сигнатур и их сочетаниям, другим особенностям по спутниковым и радарным данным. Так, например, для объектов суперячеек определяющим критерием было наличие сигнатуры *hook echo* по радарным данным, а также иногда крючкообразная форма по визуальным спутниковым изображениям, а также вспомогательно: наличие (не всегда) и характерное взаимное расположение спутниковых сигнатур OT и Cold-U/V/ring

[6, 8, 10]. Для МКК – наличие выраженного слоистообразного и конвективного регионов по радарным данным [3], замкнутой, устойчивой во времени жизни области с ТВГО $< -32\text{ }^{\circ}\text{C}$ по ИК спутниковым данным и др. [6].

5. Устанавливался тип синоптической ситуации (холодный фронт, линия неустойчивости, волновой циклон, теплый сектор циклона и др.) вблизи области локализации структур, а также некоторые другие крупномасштабные параметры, такие как наличие, направление и скорость струйного течения, пространственный градиент температуры на поверхности 850 гПа – по архивным картам приземного анализа и по картам барической топографии.

6. Визуально по картам, построенным по архивным прогностическим данным модели GFS (разрешения $0,5^{\circ}$) на срок, ближайший к времени стадии максимального развития структур (с разницей не более 3 ч от времени прогноза модели до времени этой стадии), устанавливались (в радиусе 0–150 км от локализации структуры / наиболее развитого элемента структуры) значения экстремумов значений таких индексов и параметров, как: *DLS*, *SRH 0-3*, *LI*, *CAPE*, *SWEAT*, *MCS*, *SCP*, *STP*, модифицированный индекс Пескова (*PIm*) и др., часто используемых для прогноза мощной организованной конвекции в мировой и отечественной практике [1, 6]. Также определялись и значения некоторых других важных параметров:

удельной влажности приземного слоя S , лапласиана приземного давления L , направления и скорости ведущего потока для конвективных образований. Также рассчитывался и визуализировался авторский экспериментальный индекс SCS (*Severe Convective Storm index*), подробнее о котором будет сказано позже.

В общем виде методику исследования можно представить в виде схемы (рис. 6).

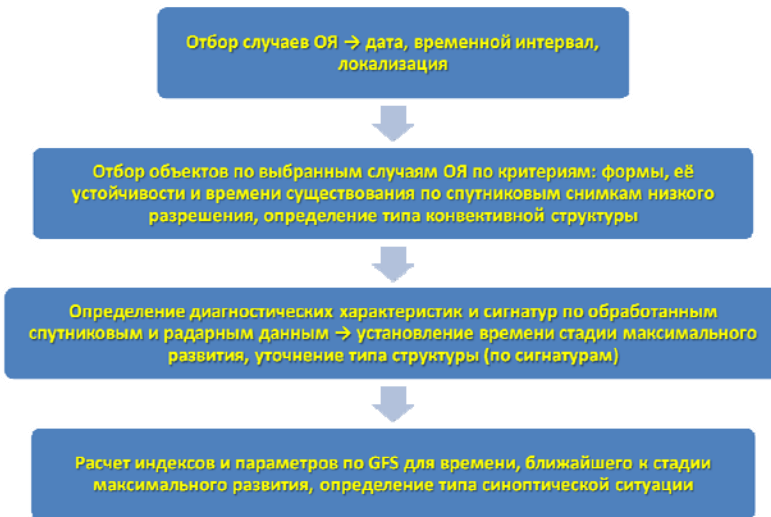


Рис. 6. Последовательность отбора объектов и их анализа.

Fig. 6. The sequence of selection of the objects and of their analysis.

Обработка данных

В работе для расчетов и визуализации индексов конвекции и других параметров по модельным данным использовалось открытое программное обеспечение *OpenGrads*. Для диагноза структур – спутниковые данные *Meteosat-8,9,10* из архива *EUMETSAT Data centre* (<https://www.eumetsat.int/website/home/Data/DataDelivery/EUMETSATDataCentre/index.html>) в виде RGB-композиционных изображений (построенные с помощью *ПО MSGProc* и *ViewMSGProc*), а также данные (карты метеоявлений, иногда максимальной отражаемости, высоты радиозеха) метеорологических радиолокаторов *МРЛ-5* и *ДМРЛ-С* из архива Центральной аэрологической обсерватории и архива ресурса: http://www.pogoda.by/flmaps/?map=region_radar. Карты приземного синоптического анализа – из архива на ресурсе: http://www1.wetter3.de/archiv_dwd_dt.html.

Итого проанализировано около 24 различных характеристик по каждому случаю мощной организованной конвекции по указанной территории. Пример (и общие принципы) комплексного исследования отдельного

случая (13.07.2016 г., который также вошел в выборку) представлен автором в ранее опубликованной статье [2].

Все данные заносились в итоговую таблицу для последующего статистического анализа, для которого использовалось ПО STATISTICA и Microsoft Excel.

Основные результаты

1. Распределение типов конвективных структур, типов синоптической ситуации и сигнатур в выборке, а также значений температуры верхней границы облачности и высоты радиозха по всем случаям показано на рис. 7–12. Ниже даны пояснения и описание результатов.

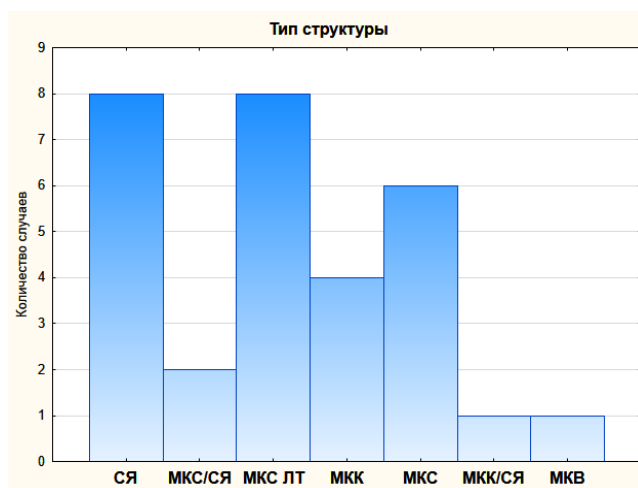


Рис. 7. Распределение (число случаев) типов конвективных штормов. СЯ – суперячейка, МКС – мезомасштабная конвективная система (симметричного типа), МКК ЛТ – линейного типа, МКК – мезомасштабный конвективный комплекс, МКВ – мезомасштабный конвективный вихрь, МКК/СЯ, МКС/СЯ – сочетание вышеуказанных типов за одно событие.

Fig. 7. Distribution (number of cases) of types of convective storms. СЯ - supercell, МКС – mesoscale convective system (axisymmetric type), МКК ЛТ – linear type, МКК – mesoscale convective complex, МКВ - mesoscale convective vortex, МКК/СЯ, МКС/СЯ – combination of the above types in one event.

Преобладающими типами структур в выборке были мезомасштабные конвективные системы (линейного и квази-осесимметричного типа), затем суперячейки и мезомасштабные конвективные комплексы. Практически единичными были случаи сочетания двух типов структур.

На рис. 8 показана карта распределения случаев по территории, при этом отмечена приближенная локализация структур разного типа в зрелой стадии развития.

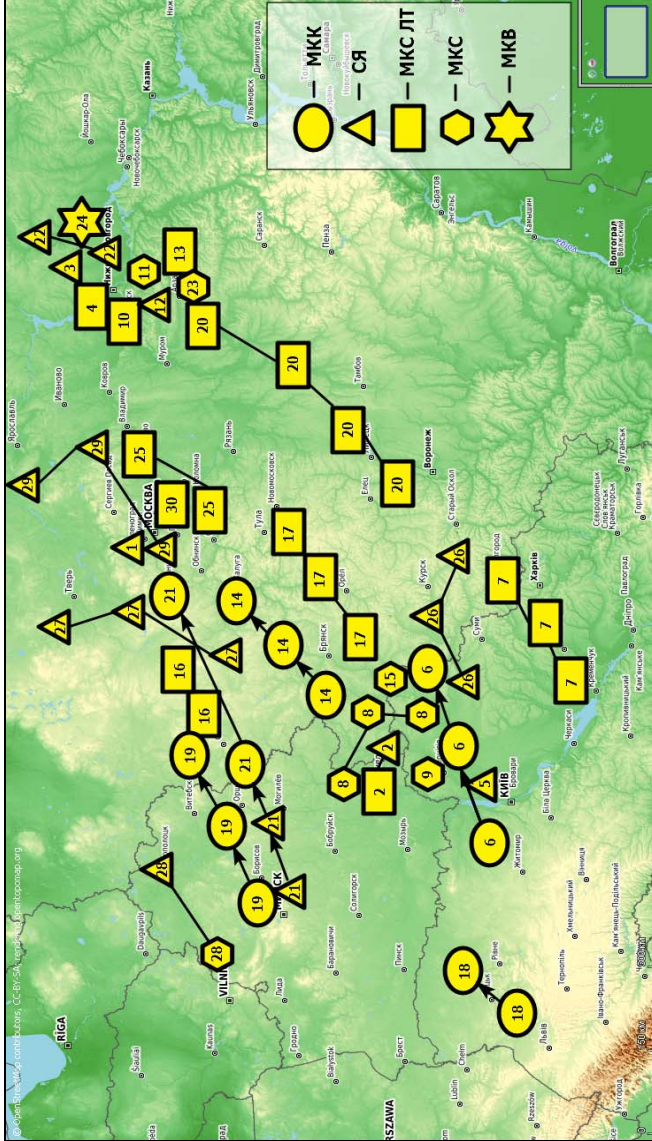


Рис. 8. Распределение по исследуемой территории локализации анализируемых конвективных структур разного типа в стадии максимального развития (разные типы отмечены разными значками, указан также порядковый номер случая в выборке).

Fig. 8. Localization of the distribution convective structures of different types in the maximum stage of development by the study area (different types are marked by different icons, the sequential case number in the sample are marked also).

Ниже (рис. 9) представлена диаграмма распределения типов синоптических ситуаций, при которых отмечались мощные конвективные структуры.

Видно, что преобладающими типами синоптической ситуации, наблюдавшимися при зрелой стадии развития структур всех типов были: линия неустойчивости (ЛН), волновой циклон (ВЦ) и холодный фронт (ХФ). Также присутствовали случаи с волновыми процессами на холодном и квазистационарном фронтах (обозначены сокращениями ХФВ, В на рис. 9), единичные случаи были связаны с процессом окклюзии (ФО, ТО) и с развитием структур в теплом секторе (ТС) циклона (но без формирования линии неустойчивости).

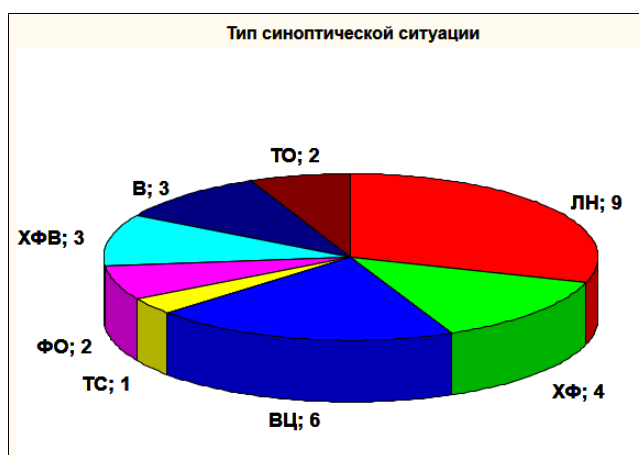


Рис. 9. Распределение (число случаев) типов синоптической ситуации. ЛН – линия неустойчивости, ХФ – холодный фронт; ВЦ – волновой циклон; ТС – теплый сектор циклона; ФО – фронт окклюзии; ХФВ – холодный фронт с волнами; В – волна на квазистационарном фронте; ТО – точка окклюзии.

Fig. 9. Distribution (number of cases) of types of synoptic situation. ЛН – instability line; ХФ – cold front; ВЦ – wave cyclone; ТС – warm sector of cyclone; ФО – occlusion; ХФВ – cold front with waves; В – wave on the quasistationary front; ТО – point of occlusion.

Далее представлено (рис. 10) распределение (доля в %) типов сигнатур, наблюдавшихся по спутниковым данным, и их сочетаний для всех типов штормов. Определение сигнатур дано в [4, 7, 9]. Видно, что мощные штормы имели преимущественно такие виды сигнатур: сочетание Overshooting Top + Cold-U/V/ring (OT CUR) – в 52 % случаев, отдельная сигнатура OT – в 28 % случаев, а также сочетание OT CUR вместе с сигнатурой Gravity Waves (OT CUR GW) – в 14 % случаев. Необходимо отметить, что сигнатуры, определенные по спутниковым данным, присутствовали практически во всех (29 из 30) анализируемых случаях. При этом

из рассмотрения повторяемости следует, что сигнатура ОТ (в сочетании с другими и отдельно) наблюдалась в целом в 94 % (т. е. в подавляющем большинстве) случаев. Это говорит о высокой повторяемости вероятности пробоя тропопаузы у мощных штормов любого типа. В то же время немного меньшей, но все же очень значительной (73 % случаев) повторяемостью обладала сигнатура Cold-U/V/ring – определенное (U-, V- либо кольцеобразное) распределение поля температуры верхней границы конвективного шторма. По некоторым исследованиям [5, 8], данная сигнатура присуща часто наиболее мощным конвективным штормам с опасными явлениями, что подтверждается и результатами данного исследования.

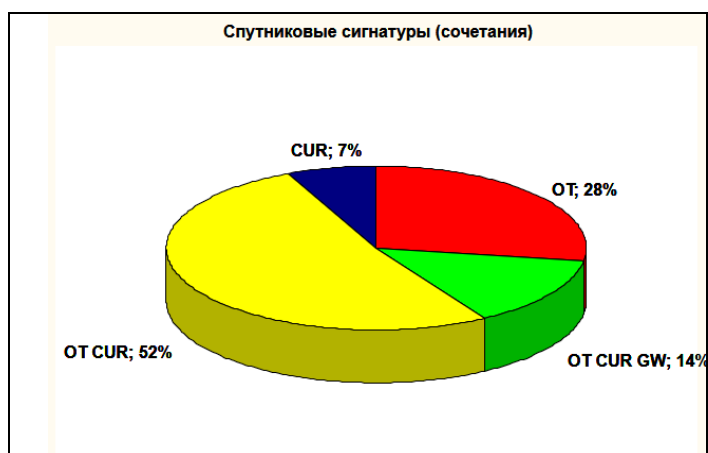


Рис. 10. Распределение (% от общего числа случаев) типов сигнатур, определяемых по спутниковым данным. ОТ – Overshooting Top; CUR – Cold-U/V/ring; GW – Gravity Waves.

Fig. 10. Distribution (% of the total number of cases) of types of signatures determined by satellite data. OT – Overshooting Top; CUR – Cold-U/V/ ring; GW – Gravity Waves.

В 14 % случаев в сочетании (всегда) с вышеописанными сигнатурами (ОТ CUR) наблюдались также т. н. гравитационные волны (GW) на поверхности наковальни шторма (сигнатура описана, в частности, в [8]), сигнализирующие, по-видимому, о мощной турбулентности вблизи зоны значительного пробоя тропопаузы (вероятно, связанного с наиболее мощными восходящими потоками внутри шторма) с распространением концентрических волн от этой зоны к периферии наковальни.

Распределение типов конвективных структур по наблюдаемым типам спутниковых сигнатур и их сочетаниям (рис. 11) показывает, что, например, для СЯ и МКС чаще характерно сочетание сигнатур ОТ CUR, а для МКС ЛТ – в равной степени ОТ и ОТ CUR, для МКК чаще имеет место одиночная сигнатура ОТ, а другие сигнатуры (в т. ч. CUR) наблюдались реже.

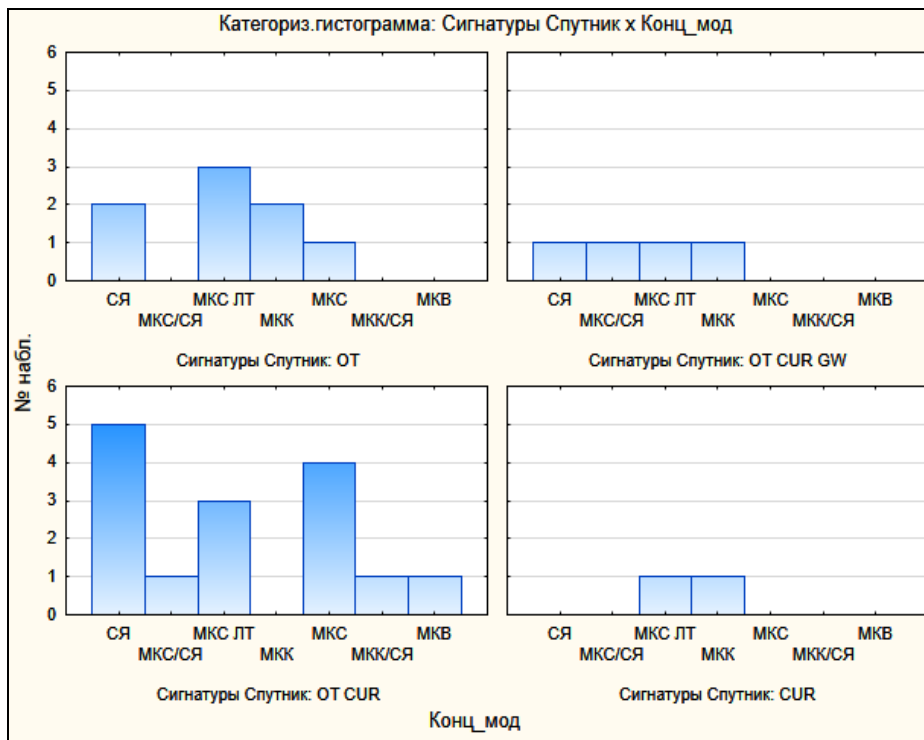


Рис. 11. Распределение (число случаев) типов структур (штормов) по типам сигнатур, определяемых по спутниковым данным, и их сочетаниям (сокращения см. выше).

Fig. 11. Distribution (number of cases) of the types of structures (storms) by type of signature, determined by satellite data and their combinations. (see abbreviations above).

Ниже (рис. 12) представлены гистограммы распределения минимальных значений температуры верхней границы облачности (по радиационной температуре канала IR 10.8 μm) в области шторма по данным радиометра SEVIRI спутников Meteosat и максимальной высоты радиоэха по радарным (МРЛ-5 и ДМРЛ-С) данным (рис. 11). Видно, что характерные значения температуры составили -62...-66 °С (среднее значение и мода: -64°С), а высоты – 14–15 км (при этом значение 15 км является модой).

2. Далее рассмотрим связь типов структур и типов синоптической ситуации, а также распределение опасных явлений. В табл. 1 показано распределение числа случаев типов синоптической ситуации для разных концептуальных моделей, по которому можно установить некоторые закономерности, например, случаи СЯ чаще всего были связаны с линиями неустойчивости, иногда – с волновыми циклонами, случаи с МКС ЛТ – с холодными фронтами и линиями неустойчивости, иные МКС (симметричного типа) – с фронтами окклюзии и холодными фронтами с волнами.

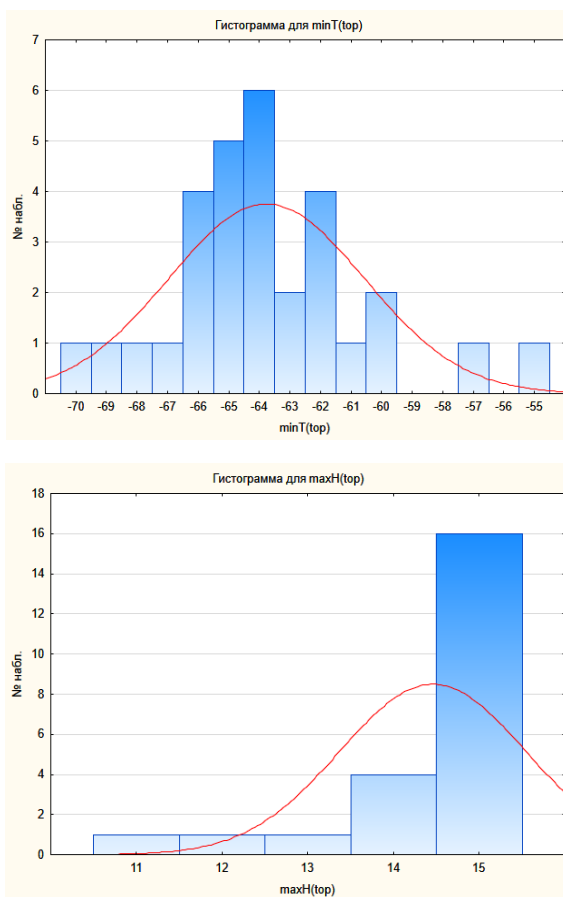


Рис. 12. Распределение минимальных значений температуры на верхней границе облачности по данным Meteosat (сверху) и максимальной высоты радиоэха по данным МРЛ-5 и ДМРЛ-С (снизу).
Fig. 12. Distribution of the minimum temperature at the upper cloud boundary according to Meteosat data (above) and the maximum height of the radio echo according to the MRL-5 and DMRL-C (below).

Опасные конвективные явления классифицировались по следующему принципу:

1) наличие («да/нет») таких явлений, как сильный ливень, крупный град, умеренный и сильный шквал, смерч (любой категории). В категорию «шквал» были отнесены также и сильные порывы ветра (≥ 15 м/с) при грозах;

2) сочетание явлений (например, ливень, град, шквал – ЛГШ и т. п.) по каждому случаю.

При этом точные данные об интенсивности (таких параметрах, как размер, скорость и т. д.) явлений хотя и заносились в базу, но не обрабатывались по причине специфики базы данных ESWD, так как, во-первых,

эти параметры присутствуют только для части зарегистрированных случаев; во-вторых, для данной базы часто используются данные очевидцев, измерения и оценка интенсивности, произведенные которыми не обладают достаточной точностью. При этом данные о самих явлениях и последствиях, характерных для определенных явлений (разрушения), подтверждены документально, и поэтому факт явлений не подвергается сомнениям. Достоинством выбранной базы данных является заведомо большая частота регистрации явлений, чем по данным сети метеостанций, являющейся редкой для регистрации мезомасштабных конвективных процессов и явлений, с ними связанных.

Анализировалось как распределение ОЯ по типам синоптической ситуации и типам структур (табл. 2, 3), так и повторяемость различных (зарегистрированных для случаев) сочетаний явлений (рис. 13).

Таблица 1. Распределение частоты типов синоптической ситуации по типам конвективных структур (сокращения см. выше)

Table 1. Frequency distribution of synoptic situation types according to types of the convective structures (see abbreviations above)

Тип конвект. структуры	Тип синоптической ситуации								Всего
	ЛН	ХФ	ВЦ	ТС	ФО	ХФВ	В	ТО	
СЯ	4	0	2	0	0	0	0	2	8
МКС/СЯ	1	0	0	0	0	1	0	0	2
МКС ЛТ	2	4	2	0	0	0	0	0	8
МКК	1	0	0	1	0	0	2	0	4
МКС	0	0	1	0	2	2	1	0	6
МКК/СЯ	0	0	1	0	0	0	0	0	1
МКВ	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Всего	9	4	6	1	2	3	3	2	30

Таблица 2. Распределение частоты наличия опасных явлений по типам конвективных структур (сокращения см. выше)

Table 2. Distribution of the frequency of presence of dangerous phenomena by types of the convective structures (see abbreviations above)

Тип конвект. структуры	Ливень	Град	Шквал	Смерч	Всего
СЯ	2	7	7	5	21
МКС/СЯ	0	2	1	1	4
МКС ЛТ	4	7	5	3	19
МКК	3	4	4	2	13
МКС	2	4	5	1	12
МКК/СЯ	0	1	1	1	3
МКВ	0	0	0	0	0
Всего	11	25	23	13	

Таблица 3. Распределение числа случаев опасных явлений по типам синоптических ситуаций (сокращения см. выше)

Table 3. Distribution of the number of cases of hazardous weather events by type of synoptic situations (see abbreviations above)

Синоптическая ситуация	Ливень	Град	Шквал	Смерч	Всего
ЛН	3	8	7	5	23
ХФ	2	3	3	1	9
ВЦ	2	4	5	3	14
ТС	1	1	1	0	3
ФО	1	2	2	0	5
ХФВ	1	3	2	0	6
В	1	2	2	3	8
ТО	0	2	1	1	4
Всего	11	25	23	13	

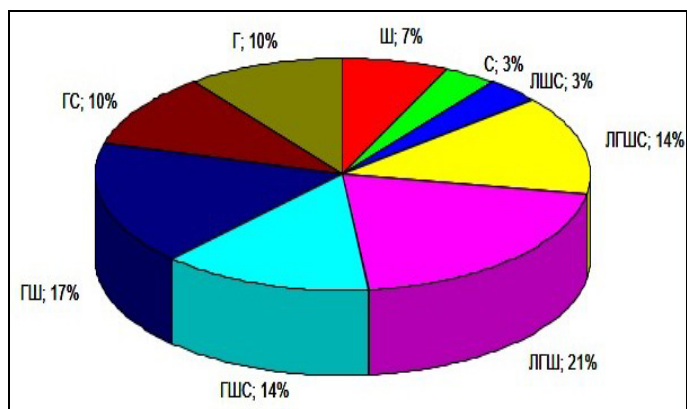


Рис. 13. Распределение частоты (в % от общего числа случаев) сочетаний опасных явлений по случаям мощных конвективных штормов (сокращения: Л – ливень, Г – град, Ш – шквал, С – смерч).

Fig. 13. Frequency distribution (% of the total number of cases) of combinations of dangerous phenomena by cases of severe convective storms (abbreviations: Л – rainfall, Г – hail, Ш – squall, С – tornado).

Из приведенного анализа, например, следует, что сильные ливни больше характерны для МКК и МКС ЛТ, град – для СЯ, МКС ЛТ, шквал – для СЯ, МКС и МКС ЛТ, смерч – преимущественно для СЯ, в меньшей степени для МКС ЛТ.

Распределение по типам синоптической ситуации (табл. 3) показывает, во-первых, что большая часть явлений вообще наблюдалась на линиях

неустойчивости (прежде всего град, а также шквал и смерч) и в волновых циклонах. В меньшей степени – на холодных фронтах и волновых процессах на фронтах.

Если рассматривать распределение повторяемости тех сочетаний явлений или явлений одного типа, которые были зарегистрированы для конкретных случаев мощных конвективных штормов (рис. 13), то можно сделать вывод о более высокой повторяемости таких сочетаний (комплекса) явлений, как град-шквал, вместе с ливнем и/или смерчем (ЛГШ, ГШ, ГШС, ЛГШС) по сравнению с повторяемостью явлений лишь одного типа.

3. Анализ направления и скорости ведущего потока для конвективных образований (рассчитанного по данным модели GFS), смещения радиоэха (по радарным данным) представлены на рис. 14, 15.

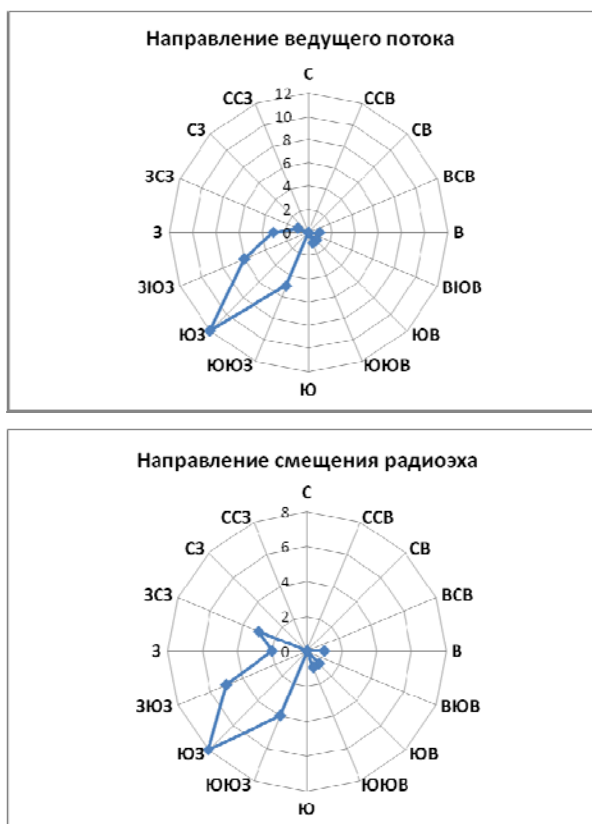


Рис. 14. Направление (число случаев) ведущего потока по данным модели GFS (сверху) и смещения радиоэха по данным МРЛ (снизу).
Fig. 14. The direction (number of cases) of the leading stream by GFS model data (above) and direction of the radio echo offset by radar data (below).

За направление ведущего потока бралось среднее из направлений на 500 и 700 гПа, его скорость рассчитывалась по формуле (1), предложенной в [4] для расчета скорости смещения конвективных образований:

$$v_{en} = 3,6 \cdot \left(\frac{9,2 + 0,29\bar{v}}{\bar{v} + 3,5} \right), \quad (1),$$

где v_{en} – скорость переноса конвективных образований, км/ч; \bar{v} – средняя из скоростей на изобарических поверхностях 500 и 700 гПа.

На рис. 15 представлено соответствующее распределение скоростей (ведущего потока и смещения радиоэха) по случаям мощной конвекции.

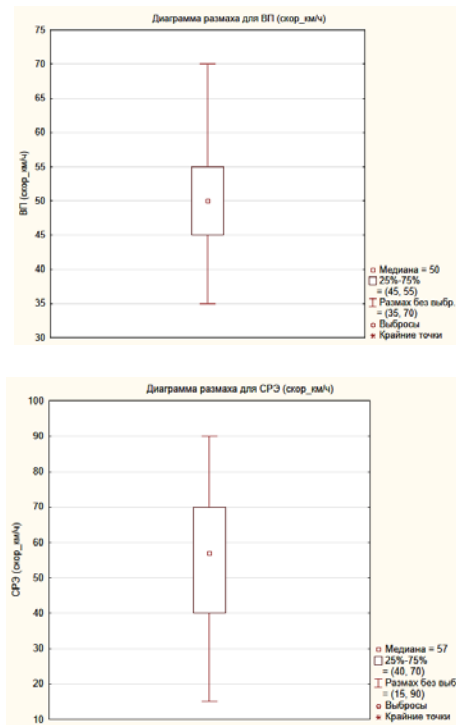


Рис. 15. Распределение скоростей ведущего потока (ВП) по данным модели GFS (сверху) и смещения радиоэха (СРЭ) по данным МРЛ (снизу).

Fig. 15. The distribution of the velocity of leading flow (ВП) by the GFS model (above) and velocity of the radio echo displacement (СРЭ) by the radar data (below).

При удовлетворительном совпадении преобладающих направлений (юго-западное направление является основным для ВП и СРЭ, см. рис. 14) и средних значений скоростей (медиана для ВП равна 50, для СРЭ – 57 км/ч) виден (рис. 15) существенно больший разброс значений для

смещения радиоэха по сравнению со значениями скорости ВП, что может быть вызвано несовершенством выбранной методики подсчета последней. При ее описании в [4] указывается на необходимость подбора региональных коэффициентов, что является целесообразным для улучшения результативности в перспективе. Дополнительным усовершенствованием может послужить введение разных коэффициентов для различных типов конвективных структур, если такие взаимосвязи (с высокой степенью значимости) будут выявлены (по большей выборке)

4. Анализировалось также распределение значений различных конвективных индексов и др. параметров (всего 13 параметров) в целом по выборке, а также по типам синоптической ситуации и типам конвективных структур. Формат статьи не позволяет отразить подробно все распределения, однако будут показаны сводные данные.

Были получены экстремумы значений следующих индексов для стадии максимального развития каждого случая мощных структур: LI (most unstable), $CAPE$ (most unstable), $SWEAT$, SCP (с использованием surface based $CAPE$), STP (модифицированный), индекс Пескова (PI_m , видоизмененный), DLS (сдвиг ветра в слое 0–6 км), SRH 0–3 (завихренность в слое 0–3 км), S (удельная влажность воздуха в приземном слое), L (лапласиан приземного давления, гПа/300 км²) и d_{850} (контраст температуры на поверхности 850 гПа в °C/500 км). Все конвективные индексы хорошо описаны в литературе [2, 7], поэтому для большинства из них здесь формулы для их расчета приводиться не будут (они идентичны представленным в указанных источниках). Укажем только некоторые видоизменения двух индексов: индекса STP (2) и индекса Пескова (3). Первый видоизменялся с введением регионального эмпирического коэффициента для более успешного прогноза смерчеопасных ситуаций (по результатам экспериментальных расчетов для случаев с зарегистрированными смерчами). В формуле индекса Пескова (для удобства расчетов в OpenGrads) параметр в авторской формуле $(T' - T)_{600}$ – отклонение кривой стратификации от кривой состояния на изобарической поверхности 600 гПа был заменен на близкий по физическому смыслу параметр LI , а параметр $\nabla^2 p_0$ (лапласиан приземного давления) – на параметр конвергенции потоков на уровне 10 м – $Conv_{10m}$. Для каждого случая также подсчитывался авторский экспериментальный индекс SCS , подробнее о котором будет сказано позднее.

$$STP_m \text{ (Significant Tornado Parameter modified)} = 1,5 STP. \quad (2)$$

$$PI_m = -0,4LI - 0,05dd_{500} + 0,4Conv_{10m} - 0,07 \left| \Delta \vec{V} \right|_{700}^{300}, \quad (3)$$

где dd_{500} – дефицит точки росы на изобарической поверхности 500 гПа;

$|\Delta \vec{V}|_{700}^{300}$ – модуль разности векторов ветра на изобарических поверхностях 300 и 700 гПа.

В табл. 4 приведены сводные данные по разным типам структур (а также и по всей выборке): средние значения индексов и параметров, а также максимальная повторяемость типов синоптической ситуации, спутниковых сигнатур, повторяемости опасных явлений в порядке убывания.

Таблица 4. Распределение средних значений индексов и преобладающей повторяемости некоторых параметров по концептуальным моделям мощных конвективных штормов

Table 4. Distribution of average indices and prevailing repeatability of some parameters by conceptual models of severe convective storms

Параметры	Тип конвект. структуры							
	СЯ	МКС/СЯ	МКС ЛТ	МКК	МКС	МКК/СЯ	МКВ	Всего
Число случаев	8	2	8	4	6	1	1	30
LI , °C	-4,3	-4,5	-4,6	-7,5	-6,5	-5,0	-9,0	-5,4
MCS	1,5	3,8	1,1	2,6	1,5	4,5	0,0	1,8
$CAPE$, Дж/кг	1856	2700	1850	2750	2583	1800	2700	2202
$SWEAT$	253	335	243	285	257	350	200	262
PIm	2,0	2,4	2,9	3,7	4,0	3,0	3,0	3,0
SCP	4,8	11,0	4,1	8,1	6,0	20,0	5,0	6,2
$STPmod$	0,9	2,3	0,8	1,0	0,8	3,0	0,5	1,0
SCS	3,9	6,0	4,3	5,4	5,6	8,0	5,0	4,9
DLS , м/с	18,9	25,0	18,1	18,8	16,7	30,0	10,0	18,7
SRH 0-3, м ² /с ²	214	275	161	184	175	500	200	201
S , г/кг	11,9	11,0	11,0	13,0	12,2	14,0	12,0	11,9
L , гПа/300км ²	10,0	9,0	8,9	7,3	10,3	20,0	4,0	9,5
T_{d850} , °C	8,4	6,5	7,9	7,5	11,0	10,0	6,0	8,5
$\min T$ (top), °C	-63,8	-66,0	-63,3	-63,3	-64,5	-64,0	-62,0	-63,8
Син. сит. (max повтор.)	ЛН	ЛН, ХФВ	ХФ	В	ФО, ХФВ	ВЦ	ЛН	ЛН
Сигн. спутн. (max повтор.)	ОТ CUR	ОТ CUR/GW	ОТ, ОТ CUR	ОТ	ОТ CUR	ОТ CUR	ОТ CUR	ОТ CUR
ОЯ (в порядке убыв. повтор.)	Г/Ш,С,	Г,Ш/С	Г,Ш,Л	Г/Ш,Л,	Ш,Г,Л	Г/Ш/С		Г,Ш

Анализ данных позволяет сделать некоторые (пока предварительные из-за небольшого числа случаев в выборке) выводы. Для разных типов мощных конвективных структур часто присущи разные как

синоптические условия (что, в принципе, является общеизвестным фактом), так и несколько различные температурно-влажностные, динамические параметры и параметры неустойчивости, проявляющиеся в разных диапазонах значений индексов и параметров. Так, например, для МКК (МКВ) характерны большие значения плавучести LI и неустойчивости $CAPE$, удельной влажности S , но меньшие: завихренности SRH_{0-3} и лапласиана приземного давления L , а для СЯ – наоборот. Эти заключения, несомненно, требует уточнения с помощью анализа большего числа случаев, что и предполагается в дальнейшем.

Данные по редким (в исследуемой выборке) случаям сочетаний концептуальных моделей (МКС/СЯ, МКК/СЯ) и единичному случаю модели МКВ не имеют пока статистической значимости и приводятся лишь для сравнения (так как имеется факт «выброса» некоторых значений для этих случаев, по сравнению с иными, причина которого пока не установлена).

5. Параллельно с проведением данного исследования была предпринята попытка разработки комплексного индекса прогноза мощных конвективных штормов (любого типа), как правило, генерирующих комплекс опасных явлений, другими словами – прогноза условий для образования мощных штормов с ОЯ. Для этого по анализу ряда случаев (большинства из вышеописанной выборки) сначала были отобраны те индексы, которые имели выраженные локализованные экстремумы значений вблизи локализации штормов (и опасных явлений) по фактическим данным. Затем, после выбора наиболее характерных значений экстремумов для каждого индекса методом подбора весовых коэффициентов к ним, была получена эмпирическая формула (4) для комплексного индекса SCS :

$$SCS = 0,083 \cdot SCP + 0,667 \cdot PIm + 0,5MCS + 0,0025 \cdot SWEAT + 0,025TI, \quad (4)$$

где TI – индекс Томпсона.

Так как некоторые из формулы этих индексов содержат иногда одни и те же переменные, можно записать полную формулу (5) индекса SCS в исходных переменных:

$$\begin{aligned} SCS = & 1,33 \cdot 10^{-8} (CAPE \cdot DLS \cdot SRH_{0-3}) + 0,27 \cdot Conv_{10m} - 0,33 \cdot dd_{500} - \\ & - 0,47 \cdot \left| \Delta \vec{V} \right|_{700}^{300} + 0,1 \cdot DLS + 6843,3 \cdot TA_{700} - 0,45 \cdot LI + 0,08 \cdot T_{d850} + \\ & + 7,5 \cdot 10^{-2} \cdot T_{850} - 6,69 \cdot T_{500} + 9,5 \cdot 10^{-3} \cdot f_{850} + 4,75 \cdot 10^{-3} \cdot f_{500} + \\ & + 0,31 \cdot \sin(d_{500} - d_{850}) - 0,025 \cdot dd_{700} - 4,54 \end{aligned} \quad (5)$$

где TA_{700} – температурная адвекция на поверхности 700 гПа; T_{850} и T_{d850} – температура и точка росы на поверхности 850 гПа; T_{500} – температура на 500 гПа; f_{500} и f_{850} – относительная влажность воздуха на 500 и 700 гПа; d_{500} и d_{850} – направление ветра на 500 и 850 гПа; dd_{500} и dd_{700} – дефицит точки росы на 500 и 700 гПа.

Таким образом, в индексе учтены многие важнейшие факторы развития и поддержания мощной конвекции: неустойчивость, плавучесть, сдвиг ветра по скорости (в нижнем 6 км слое) и направлению (между изобарическими поверхностями 300–700 и 500–850 гПа), завихренность (в нижнем 3 км слое), конвергенция приземных потоков, температурно-влажностный профиль.

Распределение значений индекса (по всем 30 случаям исследуемой выборки и по разным концептуальным моделям) показано на рис. 16. Виден относительно небольшой разброс значений индекса (максимальный разброс был установлен для СЯ), возможно, говорящий о некоторой универсальности применения его для прогнозов различного типа структур ввиду комплексного учета различных предикторов. Однако этот предварительный вывод, несомненно, требует дальнейшего подтверждения на анализе большего числа случаев.

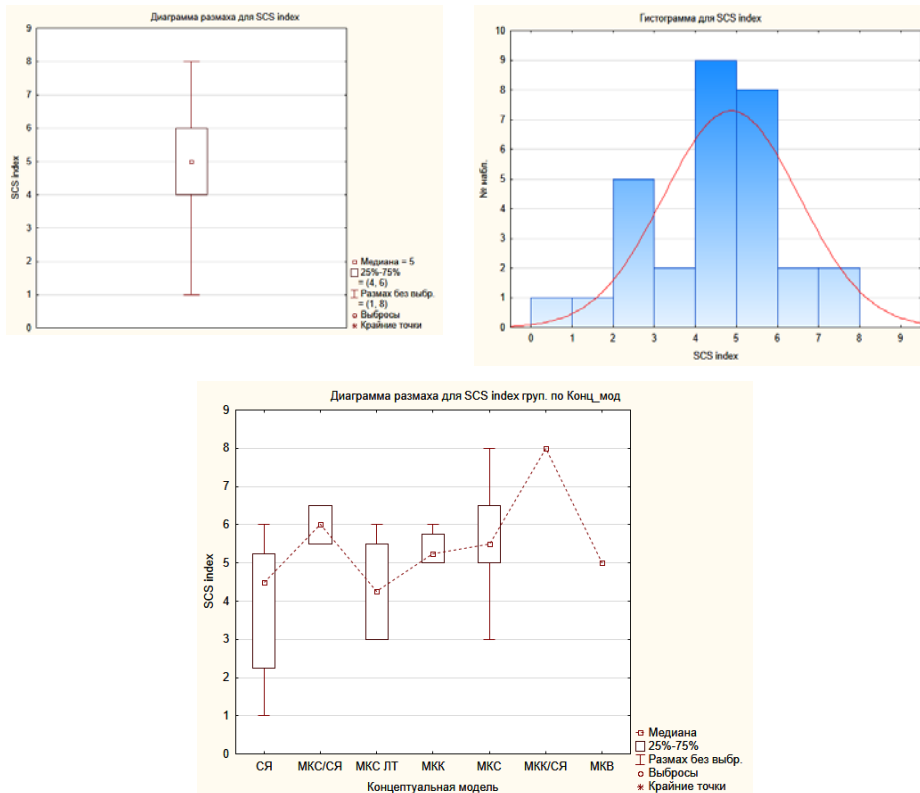


Рис. 16. Распределение значений индекса SCS по всем случаям выборки (вверху) и по концептуальным моделям (внизу).

Fig. 16. Distribution of SCS index values for all cases of the sample (above) and by conceptual models (below).

В дальнейшем планируется изучить параметры успешности: оправдываемость, предупрежденность, количество ложных тревог и т. д. индекса *SCS* прогноза мощных конвективных штормов для оценки возможности унификации прогноза условий для их развития с применением данного индекса. В данное время прогностические карты с визуализацией индекса и других важнейших параметров для прогноза мощной конвекции по модели GFS выпускаются в опытном режиме в отделе прогнозирования Белгидромета (г. Минск). Работа проводится в рамках программы Союзного государства «Развитие системы гидрометеорологической безопасности Союзного государства» на 2017–2021 гг. Планируется также выпуск аналогичных карт и по мезомасштабным модели (WRF, COSMO-Ru-By).

Представляет также практический интерес разработка отдельных индексов для прогноза различного типа конвективных структур, на основе анализа данных большего числа случаев, принципы которого отражены в данной работе.

Выводы

В результате работы были комплексно проанализированы некоторые случаи формирования мощных, долгоживущих (с временем жизни более 3 ч) организованных конвективных структур мало изменчивой формы, с которыми были связаны один или несколько (комплекс) опасных явлений, за 11-летний период. В статье отражены основные результаты исследования.

1. Преобладающими (по числу случаев) концептуальными моделями в выборке явились конвективные структуры МКС (симметричного и линейного типа) и СЯ, типом синоптической ситуации – линия неустойчивости и волновой циклон.

2. У большинства штормов по спутниковым данным было отмечено сочетание сигнатур OT+Cold-U/V/ring.

3. Из опасных явлений сильные ливни были присущи чаще МКК и МКС ЛТ, град и шквал/сильные порывы ветра – СЯ и МКС, смерчи – СЯ. Преобладающим сочетанием явлений – град+шквал. Большая часть явлений наблюдалась на линиях неустойчивости, холодных фронтах и в волновых циклонах.

4. Преобладающим направлением, как расчетного ведущего потока, смещения радиоэха было юго-западное направление.

5. В результате проведенного анализа получены средние значения различных расчетных параметров (конвективных индексов и др.) и некоторые особенности (предварительно установленные) их распределения по разным типам структур, что предполагает возможность применения полученных результатов в синоптической практике и предположительно может быть основой для разработки специальных индексов для прогноза разных типов конвективных структур.

6. Предложен экспериментальный комплексный индекс прогноза мощных конвективных штормов (разного типа), учитывающий комплекс благоприятных факторов (предикторов) для их развития, и проанализировано распределение его значений по исследуемой выборке.

В данной работе, к сожалению, не использовались некоторые иные важные данные: доплеровские радарные данные (в т. ч. направление и скорости течений внутри штормов), аэрологические данные, не анализировался тип воздушной массы и др. Дальнейшее развитие исследования (в т. ч. с увеличением числа случаев базы данных) планируется в т. ч. в рамках научных проектов, указанных ниже.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 18-77-10076), грантов РФФИ (проект № 18-45-520003 р_а и проект № 20-35-70044).

Список литературы

1. *Абдуллаев С. М.* Жизненный цикл мезомасштабных конвективных систем: концепция, климатология и прогноз: автореф. ... докт. геогр. наук. М.: Гидрометцентр России, 2010. 50 с.

2. *Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А.* Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017 Вып. 363. С. 101-119.

3. *Спрыгин А.А., Прохареня М.И.* Диагноз и прогноз конвективных структур с опасными явлениями по данным моделирования и дистанционного зондирования над территорией Беларуси и Центральной России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 6-22.

4. *Русин И.Н., Тараканов Г.Г.* Сверхкраткосрочные прогнозы погоды. СПб.: Изд-во РГГМИ, 1996. 308 с.

5. *Шухов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ажигов И.О.* Идентификация мезомасштабных конвективных облачных систем со смерчами по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 1. С. 223-236.

6. *Bluestein H.B.* Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics. Berlin: Springer Praxis Books, 2013. 456 p.

7. *Doswell C.A., Schultz D.M.* On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // *Electronic J. Severe Storms Meteor.* 2006. Vol. 1 (3). P. 1-22, available at: <http://www.ejssm.org/ojs/index.php/ejssm/article/view/11/10>

8. *Sevák M., Lindsey D., Novák P., Wang P., Radová M., Kerkmann J., Grasso L., Su S.-H., Rabin R., Štáštka J., Charvát Z.* Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds // *Atm. Res.* 2010 Vol. 97. P. 80-96.

9. Radar signatures for severe convective weather, available at: https://www.meted.ucar.edu/radar/severe_signatures

10. Basics of operational monitoring and nowcasting of convective storms using satellite imagery. available at <http://convectivestorm.blogspot.com>

References

1. *Abdullaev S. M.* Zhiznennyi cikl mezomasshtabnykh konvektivnykh sistem: koncepciya, klimatologiya i prognoz: avtoref. ... dokt. geogr. nauk. Moscow, Hydrometcenter of Russia, 2010, 50 p. [in Russ.].

2. *Bykov A.V., Vetrov A.L., Kalinin N.A.* The forecast of dangerous convective phenomena in the Perm Krai with use of global prognostic models. *Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 363, pp. 101-119 [in Russ.].

3. *Sprygin A.A., Prokharenya M.I.* Diagnosis and forecasting of convective structures accompanied by severe weather events based on model and remote sensing data over the territory of Belarus and central Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, vol. 369, no. 3, pp. 6-22 [in Russ.].

4. *Rusin I.N., Tarakanov G.G.* Sverhkratkosrochnye prognozy pogody. Saint Petersburg, Izd-vo RGGMI, 1996, 308 p. [in Russ.].

5. *Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Sprygin A.A., Azhigov I.O.* Identification of mesoscale convective cloud systems with tornadoes using satellite data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 223-236. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-223-236. [in Russ.].

6. *Bluestein H.B.* Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics. Berlin, Springer Praxis Books, 2013, 456 p.

7. *Doswell C.A., Schultz D.M.* On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. *Electronic J. Severe Storms Meteor.*, 2006, vol. 1, no. 3, pp. 1-22. Available at: <http://www.ejssm.org/ojs/index.php/ejssm/article/view/11/10>.

8. *Seváč M., Lindsey D., Novák P., Wang P., Radová M., Kerkmann J., Grasso L., Su S.-H., Rabin R., Štástka J., Charvát Z.* Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds. *Atm. Res.*, 2010, vol. 97, pp. 80-96.

9. Radar signatures for severe convective weather. Available at: https://www.meted.ucar.edu/radar/severe_signatures.

10. Basics of operational monitoring and nowcasting of convective storms using satellite imagery. Available at <http://convectivestorm.blogspot.com>.

Поступила в редакцию 16.01.2020 г.

Received by the editor 16.01.2020.