

УДК 551.509.5

ПРОГНОЗ КОНВЕКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ И ЕГО ВЕРИФИКАЦИЯ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

© 2020 г. С. О. Дементьева^а*, Н. В. Ильин^а, М. В. Шаталина^а, Е. А. Мареев^а

^аИнститут прикладной физики РАН, ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: svetadem91@mail.ru; dementyeva@ipfran.ru

Поступила в редакцию 11.11.2019 г.

После доработки 15.11.2019 г.

Принята к публикации 20.11.2019 г.

Представлено описание региональной системы краткосрочного прогноза опасных конвективных явлений на основе модели WRF-ARW. Показано, что основные максимумы погрешностей прогнозных температуры и вертикальной компоненты скорости ветра коррелируют с интенсивными конвективными событиями, что свидетельствует о необходимости использования дополнительных процедур верификации. Предложен метод прогноза опасных конвективных явлений, основанный на анализе расчетных пространственно-временных распределений радиолокационной отражаемости явления и сравнении их с характерными параметрами (длительность, площадь, максимальная радиолокационная отражаемость) мощных конвективных явлений. При этом пороговые значения занимаемой площади и продолжительности явления выбраны с учетом данных натурных наблюдений мощных конвективных облаков, а пороговое значение максимальной в вертикальном столбе радиолокационной отражаемости подбирается с учетом региональных особенностей. Проведена верификация метода по данным грозопеленгационной сети WWLLN и натурным измерениям квазистатического электрического поля. Показано, что при выбранных пороговых значениях длительности 20 мин и площади 50 км², оптимальное пороговое значение максимальной радиолокационной отражаемости для Нижегородской области составляет 55 дБз, при котором критерии Пирси-Обухова и Хайдке-Багрова принимают значения 0.61 и 0.62 соответственно.

Ключевые слова: опасные конвективные явления, краткосрочный прогноз, верификация, оценка точности

DOI: 10.31857/S0002351520020030

ВВЕДЕНИЕ

Развитие систем краткосрочного прогноза с заблаговременностью до 24 ч на основе современных численных моделей с учащенным циклом обновления начальных условий и усвоением региональных метеоданных является одной из наиболее сложных и приоритетных задач современной физики атмосферы. Особый эффект от внедрения подобных систем связан с повышением надежности краткосрочного прогнозирования экстремальных осадков, порывов ветра, метеоусловий в аэропортах, выпускаемых штормовых предупреждений. Необходимость развития систем краткосрочного прогноза обусловлена ростом конвективных осадков, который наблюдается в российских регионах в последние 50 лет [1]. Согласно данным работы [2], риск возникновения опасных конвективных явлений в XXI веке будет продолжаться расти.

В настоящей работе представлено описание региональной системы краткосрочного прогноза конвективных явлений в Нижегородском регионе с заблаговременностью 24 ч на основе мезомасштабной негидростатической численной моде-

ли Weather Research and Forecasting (WRF) [3, 4]. В Российской Федерации к настоящему времени накоплен значительный опыт использования данной модели. Так, в 2007 г. в Гидрометцентре России начались численные эксперименты с WRF, основная цель которых состояла в том, чтобы оценить возможность использования данной модели для краткосрочного прогноза опасных явлений, связанных с интенсивными мезомасштабными системами циркуляции: мезомасштабными конвективными системами, линиями шквалов и атмосферными фронтами [5–7]. Было показано, что модель WRF достаточно хорошо воспроизводит мезомасштабные структуры течений, связанные с глубокой конвекцией. Численные эксперименты с WRF для Сибирского федерального округа [8, 9] показали хорошие перспективы использования в различные сезоны года и при разных метеорологических условиях, в том числе при неблагоприятных и опасных погодных явлениях. Модель активно используется для проведения численных экспериментов, например, для анализа грозовой активности с помощью индексов неустойчиво-

сти атмосферы [10], разработки параметризаций атмосферных электрических процессов [11–13], моделирования образования и развития снежной метели [3], моделирования боры [14], расчета концентраций загрязняющих веществ в атмосфере [15] и др.

Наибольшие трудности в развитии региональных прогнозных систем связаны с качеством прогноза, поскольку малые пространственно-временные масштабы опасных метеоявлений не разрешаются явно и нуждаются в параметризациях. Последние, как правило, основаны на простых физических принципах и изначально содержат приближения и допущения, затрудняющие процедуру верификации. В большинстве случаев для оценки качества прогноза необходима специальная процедура, учитывающая, что прогноз с детализацией порядка 1 км не может не содержать ошибок, связанных с использованием параметризаций.

Для прогноза опасных конвективных явлений зачастую используются индексы неустойчивости атмосферы. Так, например, в работе [2] для прогноза опасных конвективных явлений в атмосфере и, в частности, смерчей используется индекс конвективной неустойчивости, основанный на информации о приповерхностной температуре и влажности воздуха. В работах [10, 16] различные индексы неустойчивости атмосферы применяются для прогноза опасных метеорологических явлений, связанных с развитием конвекции, и грозовой активности.

В настоящей работе предложен метод прогноза опасных конвективных явлений, основанный на анализе расчетных пространственно-временных распределений радиолокационной отражаемости и сравнении их с характерными параметрами (длительность, площадь, максимальная радиолокационная отражаемость) мощных конвективных облаков. При этом пороговые значения занимаемой площади и продолжительности явления считаются известными из натурных наблюдений мощных конвективных облаков, а пороговое значение максимальной в вертикальном столбе радиолокационной отражаемости подбирается с учетом региональных особенностей рассматриваемой территории. Данный метод может быть использован, в частности, в качестве блока предварительной обработки модельных данных для увеличения заблаговременности (уменьшения времени машинного счета) прогноза электрических параметров конвективных явлений, основанного на работах [11, 17].

Для анализа успешности прогноза принято использовать четырехклеточную таблицу сопряженности по двум дихотомическим признакам (наличие явления по наблюдениям и прогнозу). При этом в качестве данных наблюдений опасных конвективных явлений иногда применяются не

только данные синоптических станций, но и данные грозопеленгационных сетей. Такой подход, в частности, использовался в работе [18], а в работе [19] была исследована непосредственно связь молниевой активности с конвективными характеристиками атмосферы. В настоящей работе верификация прогноза опасных конвективных явлений проводится с привлечением данных всемирной грозопеленгационной сети WWLLN (World-Wide Lightning Location System) и данных нижегородской сети электростатических флюксометров. Использование двумерной таблицы сопряженности для оценки успешности прогноза можно встретить в ряде работ для прогноза грозовой активности на территории Центрального федерального округа [10], для прогноза опасных конвективных явлений в Пермском крае [16], для прогноза гроз на территории Нидерландов [20]. Стоит отметить, что в указанных работах прогноз проводится с использованием широкого спектра индексов неустойчивости атмосферы, однако критерии успешности прогноза при этом получаются ниже, чем для разработанного в настоящей работе метода.

1. ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Модель WRF является общедоступной моделью динамики атмосферы с открытым исходным кодом. Основную поддержку и разработку новых версий модели осуществляет Национальный центр атмосферных исследований (NCAR, США), блоки параметризаций физических величин разрабатываются различными научными группами по всему миру. Для реализации системы оперативного прогноза авторами была выбрана стратегия двух вложенных сеток (рис. 1): внешний домен с размерами 1200×1200 км (шаг сетки 3 км), покрывающий европейскую часть России, и внутренний домен с размерами 210×210 км (шаг сетки 1 км). Обе сетки имеют 41 уровень в вертикальном направлении до высоты, соответствующей давлению в 5000 Па. Центры расчетных областей соответствуют городу Нижний Новгород (точные координаты центра совпадают с месторасположением метеорологического радиолокатора Росгидромета — $56^{\circ}17'38''$ с.ш. $43^{\circ}58'40''$ в.д.). Такая конфигурация позволяет напрямую разрешать глубокую конвекцию во всей расчетной области, причем шаг внутренней сетки (1 км) достаточен для разрешения большинства наблюдаемых конвективных явлений.

В качестве основного набора параметризаций используются рекомендуемые для мелких сеток параметры с уменьшенным временем вызова модулей параметризации радиационного баланса [4, 6]: параметризация микрофизики Томпсона, параметризация длинноволновой радиации по схеме RRTM, параметризация коротковолновой радиации по схеме Дудья, периодичность вызова параметризаций радиации 3 мин, параметризация

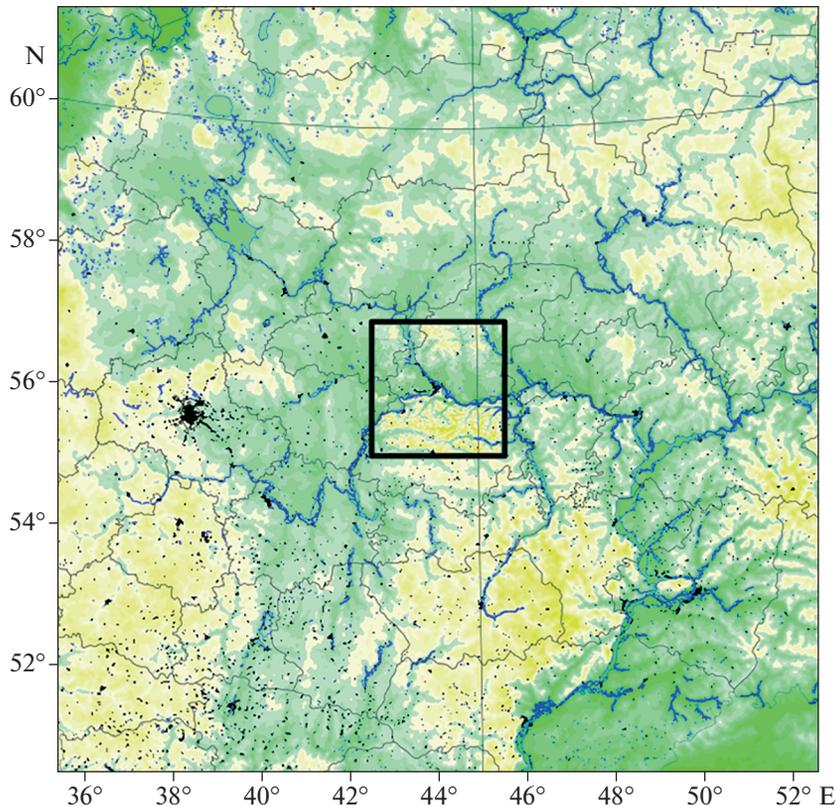


Рис. 1. Система вложенных расчетных сеток для оперативного прогноза. Внешняя: 1200×1200 км с шагом 3 км, внутренняя: 210×210 км с шагом 1 км. Центры расчетных областей расположены в Нижнем Новгороде ($56^{\circ}17'38''$ с.ш. $43^{\circ}58'40''$ в.д.).

приземного слоя по схеме подобия MM5, параметризация процессов на поверхности и в почве по пятислойной модели термической диффузии, параметризация пограничного слоя университета Енсей. В качестве начальных и граничных условий используется данные модели Global Forecasting System (GFS) с разрешением 0.25° без ассимиляции региональных метеоданных. Модель инициализируется данными по состоянию атмосферы на 00 UTC (3:00 по местному времени) ежедневно и рассчитывает прогноз на 24 ч.

2. БАЗОВАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА МОДЕЛИ

Базовая оценка точности прогноза системы проведена на основе сравнения прогнозных данных на 12 UTC и данных инициализации модели GFS 0.25° , взятых в качестве данных наблюдений, в это же время за период с 01 июня по 31 августа 2015 года. В качестве параметров, по которым оценивалась точность прогноза, были выбраны: T – трехмерная матрица температуры и w – трехмерная матрица вертикальной компоненты скорости ветра во внутренней расчетной области (210×210 км). Данные параметры атмосферы наиболее критичны для развития конвективных явлений. Для

сравнения матриц были вычислены следующие параметры:

$$\max(\Delta T) = \max_{i,j,k} |T_{forecast} - T_{obs}|,$$

$$\langle \Delta T \rangle = \frac{1}{nml} \sum_{i,j,k=1}^{n,m,l} |T_{forecast} - T_{obs}|,$$

$$\max(\Delta w) = \max_{i,j,k} |w_{forecast} - w_{obs}|,$$

$$\langle \Delta w \rangle = \frac{1}{nml} \sum_{i,j,k=1}^{n,m,l} |w_{forecast} - w_{obs}|.$$

Здесь $\max(\Delta T)$ и $\max(\Delta w)$ – максимальные по пространству (в массиве данных) ошибки в прогнозе температуры и вертикальной компоненты скорости ветра (норма максимума модуля), отвечающие за максимальный промах в произвольной точке пространства, $\langle \Delta T \rangle$ и $\langle \Delta w \rangle$ – средние по пространству (в массиве данных) ошибки в прогнозе температуры и вертикальной компоненты скорости ветра, указывающие на меру точности прогноза в целом. Индексы i, j, k обозначают перебор всех элементов матрицы, $forecast$ – данные прогноза, obs – данные наблюдения. Заметим, что уменьшение значения $\max(\Delta T)$ и $\max(\Delta w)$ предъявляет более жесткие требования к точности прогноза по сравнению с $\langle \Delta T \rangle$ и $\langle \Delta w \rangle$.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма прогноза конвективных событий.

Значения температуры $\max(\Delta T)$ в конвективные дни варьировались от 2.53 до 22.73°C со средним по конвективным дням значением 6.45°C. Значения $\langle \Delta T \rangle$ в конвективные дни находились в диапазоне от 0.41 до 1.15°C со средним по конвективным дням значением 0.69°C. При этом $\max(\Delta T)$ в отсутствие конвективных явлений имела максимальное значение 4.48°C, а средняя за весь период расчетов $\langle \Delta T \rangle$ составила 0.6°C.

Значения скорости $\max(\Delta w)$ в конвективные дни менялись от 1.14 до 35.69 м/с со средним по конвективным дням значением 12.04 м/с. Значения $\langle \Delta w \rangle$ в конвективные дни лежали в пределах от 0.06 до 0.25 м/с со средним по конвективным дням значением 0.1 м/с. При этом $\max(\Delta w)$ в отсутствие конвективных явлений имела максимальное значение 5.27 м/с, средняя за весь период расчетов $\langle \Delta w \rangle$ составила 0.08 м/с.

Отметим, что основные промахи коррелируют с интенсивными событиями, что свидетельствует о необходимости использования дополнительных процедур верификации.

3. МЕТОД ПРОГНОЗА КОНВЕКТИВНЫХ СОБЫТИЙ

В классических работах, посвященных изучению гроз [21, 22], собраны характерные параметры грозовых облаков, полученные ранее в экспериментальных исследованиях, в их числе время жизни грозовой ячейки и ее размер. Характерное время развития одиночной грозовой ячейки по данным натурных наблюдений составляет 20–30 мин.

Характерный горизонтальный размер такой ячейки составляет 8 км согласно работе [22], а в работе [21] отмечено, что горизонтальный размер конвективной области, в которой детектируется высокий уровень радиолокационной отражаемости, составляет 5–14 км. На основе этих параметров в данной работе предложен метод прогноза конвективных событий по пространственно-временному распределению радиолокационной отражаемости и реализован алгоритм отбора конвективных событий из массива данных расчетов модели WRF-ARW для Нижегородской области.

Принцип работы алгоритма отбора конвективных событий наглядно изображен на рис. 2. Полученные из модели WRF данные о радиолокационной отражаемости первоначально исследуются на предмет превышения максимальной в вертикальном столбе радиолокационной отражаемостью порогового значения, характерного для возникновения гроз. Если превышение порога не зафиксировано, то считается, что моделируемый период не содержит конвективных событий. Если зафиксировано превышение порогового значения, то проводится более детальный анализ данных на предмет продолжительности превышения порогового значения и площади, на которой оно было превышено. В разработанном алгоритме считается, что конвективное событие имеет место, если максимальная в вертикальном столбе радиолокационная отражаемость превышает пороговое значение не менее 20 мин в области площадью не менее 50 км².

4. ОЦЕНКА УСПЕШНОСТИ ПРОГНОЗА КОНВЕКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Для верификации предложенного метода прогноза конвективных явлений на основе анализа распределений радиолокационной отражаемости проведено моделирование конвективных сезонов (с мая по август) 2015 и 2016 гг. с помощью модели WRF-ARW с указанной в разделе 1 конфигурацией. Для выявления оптимального для территории Нижегородской области порогового значения радиолокационной отражаемости в разработанном методе прогноза конвективных явлений протестированы пороговые значения, равные 45, 50 и 55 дБз.

Успешность предложенного метода прогноза оценивается с использованием четырехклеточной таблицы сопряженности по двум дихотомическим признакам (наличие явления по наблюдениям и прогнозу) [20, 23]. В качестве данных наблюдений используются данные всемирной грозопеленгационной сети WWLLN за конвективные сезоны 2015–2016 гг. Кроме того, для минимизации ошибок применяются данные о количестве молниевых разрядов, полученные в результате обработки данных сети электростатических флюксометров. Заметим, что, вообще говоря, не все конвективные события сопровождаются грозовой активностью. Однако подавляющее большинство событий глубокой конвекции в исследуемом среднеширотном регионе приводит к существенной электризации и возмущениям электрического поля, фиксируемым флюксометрами.

В Нижнем Новгороде с 2012 г. ежегодно производится анализ данных грозовых событий, в частности, количества молниевых разрядов в течение конвективного сезона (май–август) [24]. Для этого используются данные непрерывных комплексных наблюдений вариаций электрического поля с помощью многофункционального экспериментального комплекса по приему и регистрации электромагнитных полей [25]. Для определения моментов грозового разряда в процессе цифровой обработки временных вариаций электрического поля, полученных в натурных наблюдениях, в данной работе применялся алгоритм, состоящий из двух этапов. На первом этапе проводится секундное усреднение исходного сигнала, на втором этапе – выделение разрядных событий. В качестве критериев разряда при этом используется следующая совокупность условий: 1) с момента последнего продетектированного разряда прошло не менее 1 с; 2) значение производной электрического поля по времени превышает заданное пороговое значение; 3) в течение 0.25 с с момента предполагаемого разряда производная электрического поля меняет знак. Пороговое значение было подобрано эмпирически, чтобы минимизировать ошибку определения разрядов при сезонной обработке сигнала (см. рис. 3). Заметим, что

нижегородская система мониторинга, предусматривающая одновременный разносенный прием электрического поля в четырех (и более) точках, позволяет решить задачу точного позиционирования разрядов с одновременной оценкой переносимого заряда [26].

Таким образом, наблюдения считаются содержащими конвективные явления при наличии в рассматриваемый период времени на заданной территории молниевых разрядов (алгоритм может быть обобщен на случай учета конвективных событий, сопровождаемых облачной электризацией без электрических разрядов). Всего в 2015 и 2016 гг. было рассмотрено по 123 дня, из них конвективные события содержали 87 и 66 дней соответственно.

Прогноз наличия конвективного явления с помощью численной модели считался оправданным, если в течение моделируемых суток (с 00 UTC до 00 UTC следующего дня) на рассматриваемой территории (210 × 210 км с центром в Нижнем Новгороде) разработанным методом прогноза идентифицировалось минимум одно конвективное явление.

Успешность прогноза конвективных событий оценивалась по общей оправдываемости (PC), предупрежденности наличия явления (POD), отношения ложных тревог (FAR), доли ложных тревог (POFD) и критерию Пирси-Обухова ($TSS = POD - POFD$), критерий Хайдке-Багрова (HSS) [20, 23]. Четыре первых характеристики могут принимать значения от 0 до 1, критерии Пирси-Обухова и Хайдке-Багрова – от –1 до 1. В случае идеального прогноза отношение ложных тревог и доля ложных тревог должны принимать нулевые значения, а общая оправдываемость, предупрежденность наличия явления, критерий Пирси-Обухова и критерий Хайдке-Багрова должны быть равны единице. При этом выбор оптимального порогового значения основывается на поиске максимума критериев Пирси-Обухова и Хайдке-Багрова при варьировании величины порога [20]. Результаты анализа оценок успешности прогноза опасных конвективных явлений с помощью предложенного метода за 2015 и 2016 гг. при различных пороговых значениях радиолокационной отражаемости представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, при пороговом значении радиолокационной отражаемости 55 дБз максимальны и критерий Пирси-Обухова, и критерий Хайдке-Багрова. При этом критерии Пирси-Обухова и Хайдке-Багрова составляют соответственно 0.6 и 0.62 для конвективного сезона 2015 г., 0.61 и 0.61 для конвективного сезона 2016 года, 0.61 и 0.62 при совместном анализе конвективных сезонов 2015–2016 гг. При этом общая оправдываемость принимает значения 0.8–0.82, а доля ложных тревог составляет 0.03 для конвективного сезона 2015 г., 0.18 для конвективного сезона 2016 г.

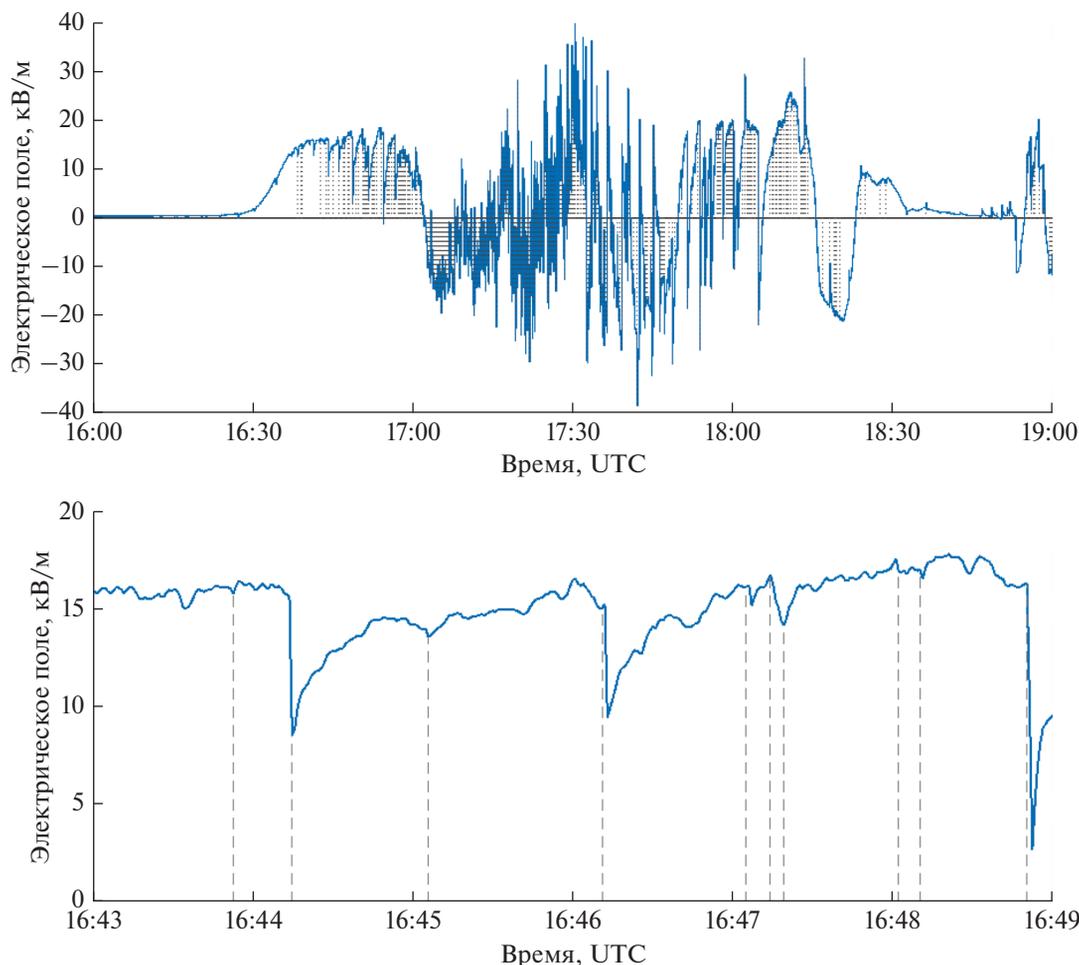


Рис. 3. Результат применения метода поиска молниевых разрядов на примере грозового события 21 июня 2015 г. 16:00–19:00 UTC. Вертикальными прерывистыми линиями отмечены моменты разрядов. Верхняя панель: полная запись вариаций электрического поля во время грозового события; нижняя панель: вариации электрического поля на периоде 16:43–16:49 UTC.

и 0.1 при совместном рассмотрении этих конвективных сезонов. Таким образом, для прогноза конвективных явлений в Нижегородской области с использованием предложенного метода 55 дБз является оптимальным пороговым значением радиолокационной отражаемости. Данное значение может, на первый взгляд, показаться завышен-

ным, однако в книге [27] можно найти подтверждения наблюдениям схожих значений на метеорологическом радиолокаторе, а в справочнике [28] приведены следующие характерные значения радиолокационной отражаемости: 45–60 дБз для одиночных ячеек, 45–65 дБз для многоячеековых систем и 55–75 дБз для суперячеек. Стоит отме-

Таблица 1. Оценки успешности прогноза опасных конвективных явлений при различных пороговых значениях радиолокационной отражаемости

	Порог	PC	POD	FAR	POFD	TSS	HSS
2015	45 дБз	0.76	0.78	0.29	0.25	0.53	0.53
	50 дБз	0.80	0.70	0.17	0.12	0.59	0.60
	55 дБз	0.82	0.63	0.06	0.03	0.60	0.62
2016	45 дБз	0.72	0.82	0.35	0.38	0.45	0.44
	50 дБз	0.76	0.81	0.29	0.29	0.52	0.51
	55 дБз	0.80	0.79	0.21	0.18	0.61	0.61
2015 + 2016	45 дБз	0.74	0.80	0.32	0.31	0.49	0.48
	50 дБз	0.78	0.76	0.24	0.20	0.56	0.56
	55 дБз	0.81	0.71	0.15	0.10	0.61	0.62

тить, что данная характеристика не является универсальной и требует адаптации под конкретный регион, используемый радиолокатор или, как в данной работе, модель атмосферы.

Анализируя результаты верификации предложенного метода прогноза, можно сделать вывод, что, используя характерные параметры конвективных и грозовых облаков, описанные, например, в классических работах [21, 22], можно добиться лучшей успешности прогноза по сравнению с применением индексов неустойчивости атмосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлено описание региональной системы краткосрочного прогноза конвективных явлений в Нижегородском регионе с заблаговременностью 24 ч на основе мезомасштабной негидростатической численной модели WRF-ARW. Наибольшие трудности в прогнозе опасных конвективных явлений связаны с тем, что малые пространственно-временные масштабы данных метеоявлений не разрешаются явно и нуждаются в параметрическом описании. Это означает, что для корректной оценки качества прогноза необходима специальная процедура, учитывающая, что прогноз с необходимым для конвективных явлений масштабом детализации не может не содержать ошибок, связанных с использованием параметризаций.

Температура и вертикальная скорость ветра являются важными параметрами атмосферы, играющими ключевую роль в формировании и развитии конвективных явлений. В рамках данной работы проведена оценка точности прогноза данных характеристик. Показано, что численная модель прогноза погоды хорошо воспроизводит данные параметры в отсутствие сильных конвективных явлений, в то время как при их наличии точность прогноза существенно падает. Из этого можно сделать вывод, что индексы неустойчивости атмосферы, основанные преимущественно на температурно-ветровых характеристиках атмосферы и производных от них величинах, во время развития интенсивных конвективных явлений не могут служить надежным инструментом верификации прогноза.

В данной работе предложен метод прогноза опасных конвективных явлений, основанный на анализе модельных пространственно-временных распределений максимальной в вертикальном столбе радиолокационной отражаемости, и их сравнении с характерными параметрами радиолокационной отражаемости мощных конвективных облаков, известными из натурных наблюдений и адаптированными для рассматриваемого региона. Верификация данного метода проведена для Нижегородской области с привлечением данных грозопеленгационной сети WWLLN и данных региональной сети измерений квазистатиче-

ского электрического поля. Результаты верификации свидетельствуют о том, что, используя характерные параметры (длительность, площадь, максимальная радиолокационная отражаемость) конвективных и грозовых явлений, можно добиться лучшей успешности прогноза, чем при использовании индексов неустойчивости атмосферы. При этом, учитывая, что оцененная в данной работе погрешность модели WRF в определении температурно-ветровых характеристик атмосферы во время интенсивных конвективных явлений достаточно высока, следует ожидать хорошую работоспособность предложенного метода для прогнозирования конвективных явлений.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-45-520003 (разработка метода прогноза), № 18-35-00673 (численное моделирование), № 18-05-80077 (сбор и анализ экспериментальных данных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O. et al. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. № 4. P. 045001.
2. Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И. Анализ изменений условий смерчегенеза в северной Евразии с использованием простого индекса конвективной неустойчивости атмосферы // Докл. АН. 2017. № 6. С. 722–727.
3. Бычкова В.И., Перов В.Л., Рубинштейн Г.К. Численное моделирование возникновения и развития снежной метели при помощи модели WRF-ARW // Труды Гидрометцентра России. 2015. № 353. С. 46–62.
4. <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>
5. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 30–44.
6. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM // 80 лет Гидрометцентру России. 1939–2010. 2010. С. 94–135.
7. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 5–18.
8. Кижнер Л.И., Нахтигалова Д.П., Барт А.А. Использование прогностической модели WRF для исследования погоды Томской области // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 358. P. 219–224.
9. Мартынова Ю.В., Зарипов Р.Б., Крупчатников В.Н. и др. Оценка качества прогноза динамики атмосферы в Сибирском регионе мезомасштабной моделью WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2014. № 7. С. 14–23.
10. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной

- модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 27–37.
11. Деметьева С.О., Ильин Н.В., Мареев Е.А. Расчет электрического поля и индекса молниевой активности в моделях прогноза погоды // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 210–217.
 12. Ferro A.O., Mansell E.R., MacGorman D.R. et al. The Implementation of an Explicit Charging and Discharge Lightning Scheme within the WRF-ARW Model: Benchmark Simulations of a Continental Squall Line, a Tropical Cyclone, and a Winter Storm // Mon. Weather Rev. 2013. V. 141. P. 2390–2415.
 13. Zhao P., Yin Y., Xiao H. The effects of aerosol on development of thunderstorm electrification: A numerical study // Atmos. Res. 2015. V. 153. № 398. P. 376–391.
 14. Торопов П.А., Шестакова А.А. Оценка качества моделирования новороссийской боры с помощью модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2014. № 7. С. 38–51.
 15. Зарипов Р.Б., Коновалов И.Б., Глазкова А.А. Расчет концентраций загрязняющих веществ с использованием модели атмосферы WRF-ARW и химико-транспортной модели CHIMERE // Метеорология и гидрология. 2013. № 12. С. 52–67.
 16. Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2017. № 363. С. 101–119.
 17. Шаталина М.В., Деметьева С.О., Мареев Е.А. Мониторинг и моделирование грозовых событий в Нижегородском регионе: интенсивная гроза 1–2 июня 2015 г. // Метеорология и гидрология. 2016. № 11. С. 81–87.
 18. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Пример сравнения индексов неустойчивости средней тропосферы в прогностической модели с информацией о грозовой активности // Метеорология и гидрология. 2014. № 5. С. 42–53.
 19. Елисеев А.В., Плосков А.Н., Чернокульский А.В. и др. Связь частоты молний со статистическими характеристиками конвективной активности в атмосфере // Докл. АН. 2019. Т. 485. № 1. С. 76–82.
 20. Haklander A.J., Van Delden A. Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands // Atmospheric Research. 2003. V. 67–68. P. 273–299.
 21. Mason B.J. A Critical Examination of Theories of Charge Generation in Thunderstorms // Tellus. 1953. V. 5. № 4. P. 446–460.
 22. Mason J. The Generation of Electric Charges and Fields in Thunderstorms // Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 1988. V. 415. № 1849. P. 303–315.
 23. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: ТРИАДА ЛТД, 2016. 312 с.
 24. Клименко В.В., Мареев Е.А., Шаталина М.В. и др. О статистических характеристиках электрических полей грозовых разрядов в атмосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 11–12. С. 864–874.
 25. Шаталина М.В., Мареев Е.А., Клименко В.В. и др. Экспериментальное исследование суточных и сезонных вариаций атмосферного электрического поля // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 3. С. 205–210.
 26. Krehbiel P.R. The Electrical Structure of Thunderstorms // Earth's Electr. Environ. Washington, D.C.: NATIONAL ACADEMY PRESS, 1986. P. 90–113.
 27. Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. 234 с.
 28. Мазин И.П., Хргиан А.Х., Имянитов И.М. Облака и облачная атмосфера. Справочник. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1989. 647 р.

Convective Phenomena Forecast and Its Verification Using Atmospheric Electricity Observations

S. O. Demytyeva^{1, *}, N. V. Ilin¹, M. V. Shatalina¹, and E. A. Mareev¹

¹*Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova, 46, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

**e-mail: svetadem91@mail.ru; demytyeva@ipfran.ru*

The description of the regional system of hazardous convective phenomena short-term forecast based on the WRF-ARW model is presented. It is shown that the main error maxima of the predicted temperature and vertical component of the wind speed correlate with intense convective events, which indicates the need for additional verification procedures. A method for predicting dangerous convective phenomena is proposed. The suggested method is based on the analysis of the simulated spatiotemporal distributions of the radar reflectivity during the phenomenon and comparison these distributions with the characteristic parameters (duration, area, maximum radar reflectivity) of powerful convective phenomena. In this case, the threshold values of the phenomenon area and the duration are selected taking into account the data of field observations of powerful convective clouds. Thus, the threshold value of the maximum radar reflectivity in the vertical column is selected taking into account regional features. The method has been verified using data from the WWLLN and ground-based field measurements of the quasi-static electric field. It is shown that for the selected threshold values of duration (20 minutes) and an area (50 km²), the optimal threshold value of maximum radar reflectivity for the Nizhny Novgorod region is 55 dBz, at which the Peirce Skill Score and Heidke Skill Score take values of 0.61 and 0.62, respectively.

Keywords: convective hazards, short-term forecast, verification, accuracy rating