

УДК 551.509.56

Универсальная процедура учета данных о грозах для численных моделей динамики атмосферы

М.М. Курбатова^{✉1–3}, Р.Ю. Игнатов^{1,2}, К.Г. Рубинштейн^{1–3*}

¹НПЦ «Мэн Мейкер»

123242, г. Москва, пер. Нововаганьковский, 5, стр. 1

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН

115191, г. Москва, ул. Большая Тульская, 52

³ФГБУ «Гидрометцентр России»

123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., 11–13

Поступила в редакцию 18.08.2023;

после доработки 03.11.2023;

принята к печати 06.11.2023

Расширение грозопеленгационных сетей в последнее время привело к росту количества данных о грозах, которые могут использоваться для верификации прогнозов гроз и являются новым источником информации о состоянии атмосферы. Эта информация может быть учтена в численных моделях динамики атмосферы, но на данный момент применяется весьма редко. В работе предложена и реализована в виде кода в рамках модели WRF-ARW универсальная процедура учета данных о положении гроз. Процедура универсальна, так как не требует использования каких-либо процедур параметризации физических процессов, и благодаря этому она может быть введена в любую гидродинамическую модель. В процедуре по данным сетей грозопеленгации определяются ячейки расчетной сетки, в которых фиксировались молнии, в них итерационно добавляется влага до возникновения термодинамической неустойчивости, а значит конвекции. Исследована эффективность этой процедуры в прогнозе осадков, температуры и влажности; проведено сравнение с другими способами учета данных о грозах. Усвоение данных грозопеленгаторов позволяет локально улучшить прогноз сильных осадков и температуры в областях, где наблюдались грозы; коэффициент прогноза интенсивных осадков Пирси–Обухова при использовании предложенного метода возрастает с 0,26 до 0,40.

Ключевые слова: усвоение данных, грозы, конвективные осадки, модель WRF-ARW, сети грозопеленгации; data assimilation, thunderstorm, convective precipitation, WRF-ARW model, lightning detection network.

Введение

Грозы — опасные метеорологические явления. Они, как правило, включают в себя серии интенсивных электрических разрядов, которые могут хорошо фиксироваться даже на больших расстояниях в несколько тысяч километров. В связи с этим в последние годы в мире быстрыми темпами растет количество специальных грозопеленгационных сетей [1–5]. Возможность обнаружения разрядов молний позволяет объективно исследовать электрическую природу гроз или конвекции [1, 2]. Включение данных о местоположении молний в численные модели динамики атмосферы [6–20] улучшает прогнозирование неблагоприятных погодных условий, сопровождающих грозы (например, сильных осадков, града и порывов ветра).

Гроза всегда связана с развитием мощных кучево-дождевых облаков, а следовательно, с сильной неустойчивостью воздуха при высоком влагосодержании. Образование фронтальных гроз вызвано прохождением атмосферных фронтов, чаще всего холодных. Они возникают вследствие подъема теплого воздуха по клину холодного, т.е. происходит вынужденная конвекция. Внутримассовые грозы образуются в кучево-дождевых облаках в результате термической конвекции на равнине или вынужденной конвекции в предгорьях и горах при подъеме воздуха вдоль наветренных горных склонов. В обоих случаях происходит разделение зарядов в облачных массах за счет интенсивных конвективных движений. Поэтому возникновение вспышек молний может быть физически связано со свойствами атмосферы, обусловленными интенсивной конвекцией [21].

В работах [6–18] было предложено несколько процедур усвоения данных о грозах в численных моделях динамики атмосферы. Краткий обзор основных идей приведен в следующем разделе. Авторы этих процедур используют связь механизмов

* Мария Михайловна Курбатова (marja1702@gmail.com); Роман Юрьевич Игнатов (prognostist@gmail.com); Константин Григорьевич Рубинштейн (k.g.rubin@googlemail.com).

образования гроз с характерными вертикальными профилями влажности и температуры, наличием гидрометеоров, высокими потоками скрытого тепла, основными триггерами для схем конвекции. Мы в своей работе взяли за основу тот факт, что грозы всегда возникают при интенсивной конвекции, и предлагаем процедуру, в которой по данным сетей грозопеленгации определяются ячейки расчетной сетки, где наблюдалась гроза. Затем в этих узлах итерационно увеличивается влажность воздуха до возникновения термодинамической неустойчивости.

Цель настоящего исследования — разработка и испытание процедуры усвоения данных грозопеленгации, не связанной с конкретной параметризацией конвекции или эмпирическими данными. Такая процедура будет универсальной, поскольку может быть внедрена в любую численную модель динамики атмосферы.

Краткий обзор методов учета грозопеленгации в численных моделях динамики атмосферы

В связи с тем что в российской периодике очень мало исследований по усвоению данных о грозах в численных моделях динамики атмосферы, приведем краткий обзор работ в этом направлении.

Первые попытки применения грозопеленгационных данных в численной модели были предложены в [6]. Авторы использовали соотношение между количеством вспышек молний и интенсивностью конвективных осадков в качестве усваиваемой переменной. При этом сами же авторы отмечали, что это соотношение может сильно различаться в разных регионах. Однако были попытки применить его еще в нескольких работах [7, 8].

В серии исследований сотрудников Университета Оклахомы (США) [9–11] представлены результаты экспериментов по усвоению данных о грозах в те дни, когда имели место интенсивные торнадо. В ячейках с наблюдавшимися грозами изменялись параметры атмосферы в начальных данных модели — менялся вертикальный профиль потока скрытого тепла конденсации; восстанавливался профиль влажности, характерный для интенсивной конвекции, по историческим эмпирическим данным. В результате отмечалось заметное улучшение прогнозов приземной температуры и горизонтальных компонент приземного ветра в течение первых 3–5 ч.

В работе [12] сотрудники университета Ланчжоу (Китай) данные о грозах преобразуются в трехмерные «прокси-поля», аналогичные полям отражаемости метеорологического радара. Авторы называют этот метод «физической инициализацией». В работе сравниваются возможности использования в численном прогнозе данных грозопеленгаторов и метеорологических локаторов. Отмечается, что грозопеленгационные данные значительно менее

привязаны к особенностям ландшафта и имеют более высокое временное и пространственное разрешение, чем данные метеорологических локаторов. Было проведено пять численных экспериментов: один контрольный и четыре с различными способами учета данных о грозах. Практически во всех экспериментах результаты прогнозов приземных полей ветра, температуры и осадков улучшались при учете данных о грозах. Показано, что данные грозопеленгационной сети коррелируют с радарной отражаемостью с коэффициентом 0,847.

В [13] описана процедура коррекции профиля влажности для форсирования конвекции в рамках параметризации глубокой и мелкой конвекции Бетса—Миллера—Янича (Betts—Miller—Janich) [22] модели Eta. Было показано улучшение прогноза сильных осадков на примере трех случаев интенсивных гроз.

Сотрудники Университета г. Афины (Греция) [14, 15] для усвоения данных о грозах варьировали конвекцию в модели WRF-ARW за счет искусственного внесения изменений в работу параметризации конвекции Каин—Фрича (Kain—Fritsch) [23]. Авторы показали, что во всех рассмотренных ими случаях при учете данных грозопеленгационных сетей численный прогноз осадков на сутки заметно улучшался.

Применимость этой схемы для территории России была рассмотрена нами подробно в работах [19, 20]. На семи прогнозах по Краснодарскому краю показано, что конфигурация прогностических полей осадков и их интенсивность заметно приблизились к эталонным как в областях, где наблюдались грозы, так и в областях, где их не было. Особенно ярко это прослеживается для осадков слабой интенсивности (0–7 мм).

В статье [16] предложен и проверен на двух ярких примерах более универсальный способ усвоения данных о грозах. В этом методе, который тестировался также на модели WRF-ARW, в ячейках с наблюдавшимися грозами провоцировалась конвективная неустойчивость путем «притягивания» относительной влажности к 100%. Были показаны явные улучшения прогноза конвективных осадков.

Приведенные выше работы используют механизмы «притягивания» (приспособления), или наджинга, модельных переменных (в основном вертикальных профилей влажности) к предполагаемым значениям. В работе [17] сделана попытка использования вариационного усвоения (4DVAR) данных о координатах молний, где для двух случаев показано значительное улучшение прогноза интенсивности осадков.

В статье [18] предложена схема изменения влажности и концентрации гидрометеоров (граупелей) в конвективных облаках в точках с координатами грозовой активности. Несмотря на общее улучшение прогноза структуры шторма и интенсивности осадков, отмечается неоднозначность влияния разных способов усвоения данных о грозах в зависимости от конкретного случая.

Алгоритмы и технологии учета данных о координатах молний в работах разных авторов отличаются друг от друга, но все эксперименты демонстрируют положительное влияние учета оперативной информации гронопеленгации на качество прогнозов приземных метеорологических характеристик. При этом существующие процедуры усвоения либо привязываются к конкретной параметризации конвективных процессов, либо разрабатывались для тропических регионов, либо используют уникальные архивные эмпирические данные. Мы же предлагаем универсальную процедуру, которая может быть внедрена в любую численную модель динамики атмосферы.

Используемая численная модель динамики атмосферы

В качестве прогностической модели применялась модель WRF-ARW [24] версии 4.4.2. Предлагаемая процедура усвоения данных о координатах молний создана в виде программного блока и позволяет использовать любую конфигурацию модели. В данных расчетах участвовали следующие параметризации: для конвекции — Kain–Fritsch [23], микрофизики облаков — NSSL2 — moment Scheme with CCN Prediction [25], радиации — RRTMG Shortwave and Longwave Schemes [26], процессов в почве — Noah–MP Land Surface Model [27], планетарного пограничного слоя — Mellor–Yamada Nakanishi Niino (MYNN) Level2.5 Scheme [28]. В качестве начальных данных и граничных условий использовались поля GFS (Global Forecast System — Глобальная система прогноза США) с пространственным разрешением 0,5°.

Данные гронопеленгации

В качестве источника информации о координатах молний использовались данные сети WWLLN [3]. Она фиксирует координаты внутриоблачных молний и молний типа облако — земля с пиковой величиной силы тока более 40 кА с помощью приемников ОНЧ-диапазона (3–30 кГц). Эта сеть функционирует с 2001 г. в Университете Вашингтона (Сиэтл, США) и ловит порядка 70–80% всех гроз.

Процедура усвоения данных о координатах молний

Координаты молний переносятся на расчетную сетку модели: для каждой ячейки модельной сетки записывается, сколько было зафиксировано в ней разрядов за каждые 30 мин. Если в ячейке был хотя бы один разряд, то в течение этих 30 мин модельного счета перед каждым вызовом параметризации конвекции вызывается процедура коррекции вертикального профиля влажности.

В этой ячейке рассчитывается вертикальный профиль потенциальной (θ) и эквипотенциаль-

ной (θ_e) температуры. Если в каком-либо слое вертикальный градиент становится положительным (слой является устойчивым), то количество водяного пара приравнивается к насыщенному водяному пару при данной температуре:

$$\frac{\partial \theta_e}{\partial z} > 0 \rightarrow Q_v = Q_s, \quad (1)$$

где Q_v — отношение смеси водяного пара, Q_s — насыщающее отношение смеси водяного пара. При этом вводится ограничение на максимальное количество добавленной удельной влажности за один вызов процедуры:

$$\Delta Q_{\max} = 0,2 \text{ г/кг}. \quad (2)$$

Изменения вносятся от уровня свободной конвекции до нижней границы тропопаузы.

После этого в модели вызывается любая выбранная процедура параметризации конвекции. Также были проведены эксперименты с разными ограничениями по высоте, увеличением содержания водяного пара и критерием устойчивости слоя.

Численные эксперименты

В качестве полигона для изучения влияния данных о грозах на прогноз погоды выбрана область европейской территории России размером 71 на 71 узел с пространственным разрешением 18 км с центром в г. Москве.

Была проведена серия расчетов для июля 2022 г. с использованием данных о координатах молний и без них согласно предлагаемой процедуре с разными параметрами, а также по методикам, предложенным в работах [15] и [16]. Обозначения и параметры экспериментов приведены в табл. 1.

Анализ работы предложенной процедуры и некоторых ее параметров

Проанализируем результаты применения предложенной процедуры на примере случая 07.07.2022 г. с высокой молниевой активностью. На рис. 1 показаны изменения со временем количества ячеек модельной сетки, в которых по данным сети WWLLN были зафиксированы молнии. Гроза фиксировалась большую часть дня практически по всей области, с 11:00 до 18:00 «грозовыми» были более 5% ячеек модельной сетки.

На рис. 2 (цв. вкладка) показан временной ход изменения вертикального профиля содержания водяного пара в точке, в которой фиксировались молнии. Во время работы процедуры произошло увеличение содержания водяного пара до 4,5 г/кг, а затем его уменьшение, вызванное выпадением осадков, образовавшихся за счет увеличения влаги.

Эксперименты по анализу учета данных грозопеленгаторов

Обозначение	Процедура учета данных о грозах	Особенности учета гроз
Base	Нет	Без учета гроз
Heath	[15]	—
Dixon	[16]	—
Курбатова	Предлагаемая процедура	Приведена в статье без изменений
1 г	Предлагаемая процедура	$\Delta Q_{\max} = 1 \text{ г/кг}$
10 г	Предлагаемая процедура	$\Delta Q_{\max} = 10 \text{ г/кг}$
P1000	Предлагаемая процедура	Без ограничения по высоте
Градиент ТН	Предлагаемая процедура	Неустойчивость слоя определяется по потенциальной температуре
Градиент 0,2	Предлагаемая процедура	Неустойчивость определяется по градиенту $(0,2\theta + 0,8\theta_e)$
Градиент 0,5	Предлагаемая процедура	Неустойчивость определяется по градиенту $(0,5\theta + 0,5\theta_e)$
Градиент 0,8	Предлагаемая процедура	Неустойчивость определяется по градиенту $(0,8\theta + 0,2\theta_e)$

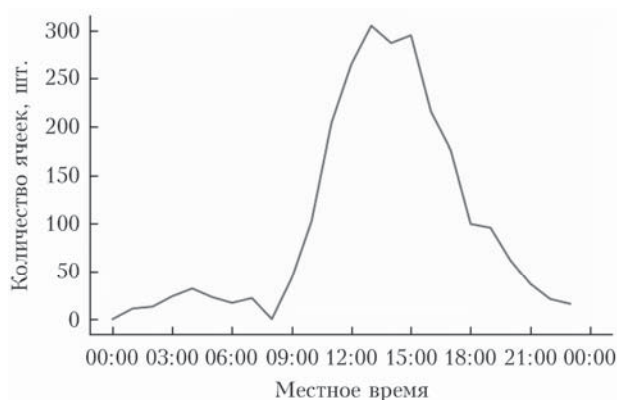


Рис. 1. Изменение со временем количества ячеек модельной сетки, в которых были зафиксированы молнии 07.07.2022 г. по данным сети WWLLN

На рис. 3 (цв. вкладка) приведены карты осадков в этот день по данным наблюдений синоптических станций и данным GPCP [29] и расчетов с разными методами учета данных о грозах. В большинстве экспериментов, в которых учитывались данные о грозах, прогнозируется увеличение осадков в местах, где фиксировались молнии, что в целом соответствует наблюдениям в центре рассматриваемой области.

Процедура, предложенная в работе [16], приводит к переоценке количества осадков. Схема же из [15], наоборот, недооценивает его (рис. 3). Изменения прогнозов в экспериментах с использованием предложенной нами процедуры не столь велики, но дают более реалистичную картину выпадения осадков.

Ограничение максимального увеличения влагосодержания за один шаг существенно не влияет на результаты прогноза, но приводит к большей устойчивости численной схемы.

Отсутствие ограничения по высоте на изменение влажности приводит к значительному увеличению влагосодержания в нижней части атмосферы и избыточному увеличению интенсивности осадков.

Варьирование градиента температуры, по которому определяется неустойчивость слоя, не приводит к таким радикальным изменениям поля осадков. На основе визуального анализа сложно определить, какое значение является оптимальным, поэтому определим его на основе статистического анализа результатов.

Статистическая оценка эффекта от учета гроз в численном прогнозе

Для обобщения выводов, полученных в предыдущем разделе, были рассчитаны статистические оценки прогнозов осадков и приземной температуры воздуха (табл. 2–5). В табл. 2–4 приведены данные о сопряженности и полученные на их основе оценки общей оправдываемости, предупрежденности прогнозов, коэффициентов Пирси–Обухова и Багрова.

Учет данных о грозах незначительно влияет на общий прогноз осадков. Однако при выделении случаев интенсивных осадков (более 5 мм/12 ч) и ячеек, в которых за рассматриваемые сутки фиксировалась гроза, можно заметить увеличение предупрежденности прогноза осадков. Коэффициент прогноза интенсивных осадков Пирси–Обухова при использовании предложенной схемы с градиентом по потенциальной температуре возрастает с 0,32 (без учета данных) до 0,42 (с 0,26 до 0,40 в ячейках с грозами).

Вносимые изменения могут оказать опосредованное влияние на все дальнейшие расчеты внутри модели. Один из показателей, который является результатом всех возможных изменений, — температура. Учет данных о грозах приводит к уменьшению ошибок прогноза приземной температуры (табл. 5). Систематическая ошибка при использовании предложенной схемы с градиентом потенциальной температуры в ячейках с грозами уменьшается с 0,84 до 0,47.

Таблица 2

Оценки прогноза осадков за 12 ч (с 03:00 до 15:00 07.07.2022 г.)

Эксперимент	n_{11}	n_{12}	n_{21}	n_{22}	Общая оправдываемость	Предупрежденность	Коэффициент Пирси–Обухова	Коэффициент Багрова
Base	3016	3216	247	3015	0,64	0,92	0,41	0,34
Heath	2855	3296	408	2935	0,61	0,87	0,35	0,29
Dixon	3077	3485	186	2746	0,61	0,94	0,38	0,31
Курбатова	3024	3217	239	3014	0,64	0,93	0,41	0,34
Градиент ТН	3046	3288	217	2943	0,63	0,93	0,41	0,33
Градиент 0,2	3046	3277	217	2954	0,63	0,93	0,41	0,33
Градиент 0,5	3032	3233	231	2998	0,64	0,93	0,41	0,34
Градиент 0,8	3030	3208	233	3023	0,64	0,93	0,41	0,34

Примечание. Здесь и далее в таблицах: n_{11} — количество случаев, в которых осадки прогнозировались и наблюдались по факту; n_{12} — количество случаев, в которых осадки прогнозировались, но не наблюдались по факту; n_{21} — количество случаев, в которых осадки не прогнозировались, но наблюдались по факту; n_{22} — количество случаев, в которых осадки не прогнозировались и не наблюдались по факту.

Таблица 3

Оценки прогноза осадков > 5 мм/12 ч

Эксперимент	n_{11}	n_{12}	n_{21}	n_{22}	Общая оправдываемость	Предупрежденность	Коэффициент Пирси–Обухова	Коэффициент Багрова
Base	273	429	461	8331	0,91	0,37	0,32	0,33
Heath	277	589	457	8171	0,89	0,38	0,31	0,29
Dixon	379	818	355	7942	0,88	0,52	0,42	0,33
Курбатова	297	450	437	8310	0,91	0,40	0,35	0,35
Градиент ТН	361	593	373	8167	0,90	0,49	0,42	0,37
Градиент 0,2	358	574	376	8186	0,90	0,49	0,42	0,38
Градиент 0,5	319	497	415	8263	0,90	0,43	0,38	0,36
Градиент 0,8	303	481	431	8279	0,90	0,41	0,36	0,35

Таблица 4

Оценки прогноза осадков > 5 мм/12 ч в ячейках, где наблюдалась гроза

Эксперимент	n_{11}	n_{12}	n_{21}	n_{22}	Общая оправдываемость	Предупрежденность	Коэффициент Пирси–Обухова	Коэффициент Багрова
Base	80	73	154	790	0,79	0,34	0,26	0,29
Heath	68	102	166	761	0,76	0,29	0,17	0,19
Dixon	177	398	57	465	0,59	0,76	0,30	0,19
Курбатова	98	105	136	758	0,78	0,42	0,30	0,31
Градиент ТН	149	207	85	656	0,73	0,64	0,40	0,33
Градиент 0,2	113	142	121	721	0,76	0,48	0,32	0,31
Градиент 0,5	110	126	124	737	0,77	0,47	0,32	0,32
Градиент 0,8	153	222	81	641	0,72	0,65	0,40	0,33

Таблица 5

Оценки прогноза температуры воздуха на уровне 2 м над землей

Эксперимент	Систематическая ошибка		Среднеквадратическая ошибка	
	Вся область	Под грозами	Вся область	Под грозами
Base	0,27	0,84	2,00	2,44
Heath	-0,59	-0,01	1,99	2,28
Dixon	0,04	-0,09	1,95	2,20
Курбатова	0,27	0,82	2,00	2,41
Градиент ТН	0,20	0,47	1,94	2,19
Градиент 0,2	0,21	0,51	1,95	2,21
Градиент 0,5	0,25	0,71	1,98	2,32
Градиент 0,8	0,26	0,77	1,99	2,37

Заключение

Предложена универсальная процедура учета данных грозоопенгаторов в численных моделях циркуляции атмосферы. Она основана на провоцировании конвективной неустойчивости в ячейках, где по данным используемых сетей грозоопенгации фиксировались молнии, путем итерационного увеличения влагосодержания воздуха. Процедура испытана в рамках модели WRF-ARW, где применение приводит к увеличению осадков в областях с наблюдавшимися грозами. При этом картина осадков оказывается более реалистичной, чем при использовании схем из работ [15] и [16].

Эффект от предложенной процедуры прослеживается в результатах прогнозов осадков, температуры и влажности. Так, систематическая ошибка прогноза температуры уменьшается с 0,84 до 0,47 в ячейках, где наблюдались грозы.

Усвоение данных грозоопенгаторов разработанной процедурой может локально улучшить прогноз сильных осадков и температуры в областях, где наблюдались грозы. Коэффициент прогноза осадков Пирси–Обухова возрастает с 0,26 до 0,40.

Таким образом, предложенная процедура позволяет использовать новый тип данных наблюдений в любых моделях численного прогноза погоды, что приводит к его улучшению.

Список литературы

1. Cummins K.L., Murphy M.J. An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the US NLDN // IEEE Trans. Electromag. Comp. 2009. V. 51, N 3. P. 499–518.
2. Панюков А.В., Будувев Д.В., Малов Д.Н. Системы пассивного мониторинга грозовой деятельности // Вест. Южно-Уральского гос. ун-та. Сер.: Математика. Механика. Физика. 2003. № 4. С. 11–20.
3. Lay E.H. Investigating lightning-to-ionosphere energy coupling based on VLF lightning propagation haracterization: PhD Thesis. Seattle: University of Washington, 2008. 26 p.
4. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О. Система грозоопенгации на Северном Кавказе // Метеорол. и гидрол. 2013. № 1. С. 5–11.
5. Снегуров А.В., Снегуров В.С. Экспериментальная грозоопенгационная система // Тр. ГГО. 2012. Вып. 567. С. 188–200.
6. Alexander G.D., Weinman J.A., Karyampudi V.M., Olson W.S., Lee A.C.L. The effect of assimilating rain rates derived from satellites and lightning on forecasts of the 1993 Superstorm // Mon. Weather Rev. 1999. V. 127, N 7. P. 1433–1457.
7. Chang D.E., Weinman J.A., Morales C.A., Olson W.S. The effect of space borne microwave and ground-based continuous lighting measurements on forecasts of the 1998 Groundhog 2 day storm // Mon. Weather Rev. 2001. V. 129. P. 1809–1833.
8. Pessi A.T., Businger S. The impact of lightning data assimilation on a winter storm simulation over the North Pacific Ocean // Mon. Weather Rev. 2009. V. 137, N 10. P. 3177–3195.
9. Fierro A.O., Mansell E.R., Ziegler C.L., MacGorman D.R. Application of a lightning data assimilation technique in the WRF-ARW model at cloud-resolving scales for the tornado outbreak of 24 May 2011 // Mon. Weather Rev. 2012. V. 140, N 8. P. 2609–2627.
10. Fierro A.O., Clark A.J., Mansell E.R., MacGorman D.R., Dembek S.R., Ziegler C.L. Impact of storm-scale lightning data assimilation on WRF-ARW precipitation forecasts during the 2013 warm season over the contiguous United States // Mon. Weather Rev. 2015. V. 143, N 3. P. 757–777.
11. Fierro A.O., Gao J., Ziegler C.L., Calhoun K.M., Mansell E.R., MacGorman D.R. Assimilation of flash extent data in the variational framework at convection-allowing scales: Proof-of-concept and evaluation for the short-term forecast of the 24 May 2011 tornado outbreak // Mon. Weather Rev. 2016. V. 144, N 11. P. 4373–4393.
12. Wang Y., Yang Y., Wang C. Improving forecasting of strong convection by assimilating cloud-to-ground lightning data using the physical initialization method // Atmos. Res. 2014. V. 150. P. 31–41.
13. Papadopoulos A., Chronis T.G., Anagnostou E.N. Improving convective precipitation forecasting through assimilation of regional lightning measurements in a mesoscale model // Mon. Weather Rev. 2005. V. 133, N 7. P. 1961–1977.
14. Giannaros T.M., Kotroni V., Lagouvardos K. WRF-LTNGDA: A lightning data assimilation technique implemented in the WRF model for improving precipitation forecasts // Environ. Model. Softw. 2016. V. 76. P. 54–68.
15. Heath N.K., Pleim J.E., Gilliam R.C., Kang D. A simple lightning assimilation technique for improving retrospective WRF simulations // J. Adv. Model. Earth Syst. 2016. V. 8, N 4. P. 1806–1824.
16. Dixon K., Mass C.F., Hakim G.J., Holzworth R.H. The impact of lightning data assimilation on deterministic and ensemble forecasts of convective events // J. Atmos. Ocean. Technol. 2016. V. 33, N 9. P. 1801–1823.
17. URL: <https://arxiv.org/abs/1306.1884> (last access: 14.02.2024).
18. Chen Z., Qie X., Liu D., Xiong Y. Lightning data assimilation with comprehensively nudging water contents at cloud-resolving scale using WRF model // Atmos. Res. 2019. V. 221. P. 72–87.
19. Рубинштейн К.Г., Губенко И.М., Игнатов Р.Ю., Тухоненко Н.Д., Юсупов Ю.И. Эксперименты по усвоению данных сети грозоопенгации // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 11. С. 936–941; Rubinstein K.G., Gubenko I.M., Ignatov R.Yu., Tikhonenko N.D., Yusupov Yu.I. Experiments on lightning detection network data assimilation // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 2. P. 219–228.
20. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Пример усвоения данных нескольких сетей грозоопенгации в численном прогнозе погоды // Оптика атмосфер. и океана. 2021. Т. 34, № 10. С. 803–807; Gubenko I.M., Rubinstein K.G. An example of assimilation of data from several lightning detection networks in a numerical weather forecast // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 1. P. 65–71.
21. Feng G., Qie X., Yuan T., Niu S. Analysis on lightning activity and precipitation structure of hailstorms // Sci. China. Ser. D. Earth Sci. 2007. V. 50, N 4. P. 629–663.
22. Janjic Z.I. The step–mountain Eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes // Mon. Weather Rev. 1994. V. 122. P. 927–945.
23. Kain J.S. The Kain–Fritsch convective parameterization: An update // J. Appl. Meteorol. 2004. V. 43, N 1. P. 170–181.

24. Skamarock W.C., Klemp J.B. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for research and NWP applications // J. Comp. Phys. 2008. V. 227, iss. 7. P. 3465–3485.
25. Mansell E.R., Ziegler C.L., Bruning E.C. Simulated electrification of a small thunderstorm with two-moment bulk microphysics // J. Atmos. Sci. 2010. V. 67. P. 171–194.
26. Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. D13103.
27. Niu Guo-Yue, Yang Z.-L., Mitchell K.E., Chen F., Ek M.B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyo-gi D., Rosero E., Tewari M., Xia Y. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. P. D12109.
28. Nakanishi M., Niino H. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer // J. Meteor. Soc. Japan. 2009. V. 87. P. 895–912.
29. Pendergrass A. & National Center for Atmospheric Research Staff. The Climate Data Guide: GPCP (Daily): Global Precipitation Climatology Project. URL: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcp-daily-global-precipitation-climatology-project> (last access: 13.08.2023).

M.M. Kurbatova, R.Yu. Ignatov, K.G. Rubinshtein. Universal procedure for lightning data assimilation in numerical models of the atmosphere.

The paper considers the possibilities of taking into account data from lightning networks in the procedure for lightning data assimilation in numerical models of atmospheric dynamics. A universal procedure is proposed and the code is implemented within the framework of the WRF-ARW model. According to the data from lightning detection networks, the cells of the computational grid are determined, in which lightning was recorded. Then moisture is iteratively added in these cells until the occurrence of thermodynamic instability and, hence, convection. The effect of using this scheme on the forecast of precipitation, temperature, and humidity is studied, and a comparison is made with other lightning assimilation methods. The use of data from lightning detectors makes it possible to locally improve the forecast of heavy precipitation and temperature in areas where thunderstorms were observed. The Piercy–Obukhov coefficient for forecasting intense precipitation using the proposed procedure increases from 0.26 to 0.40.

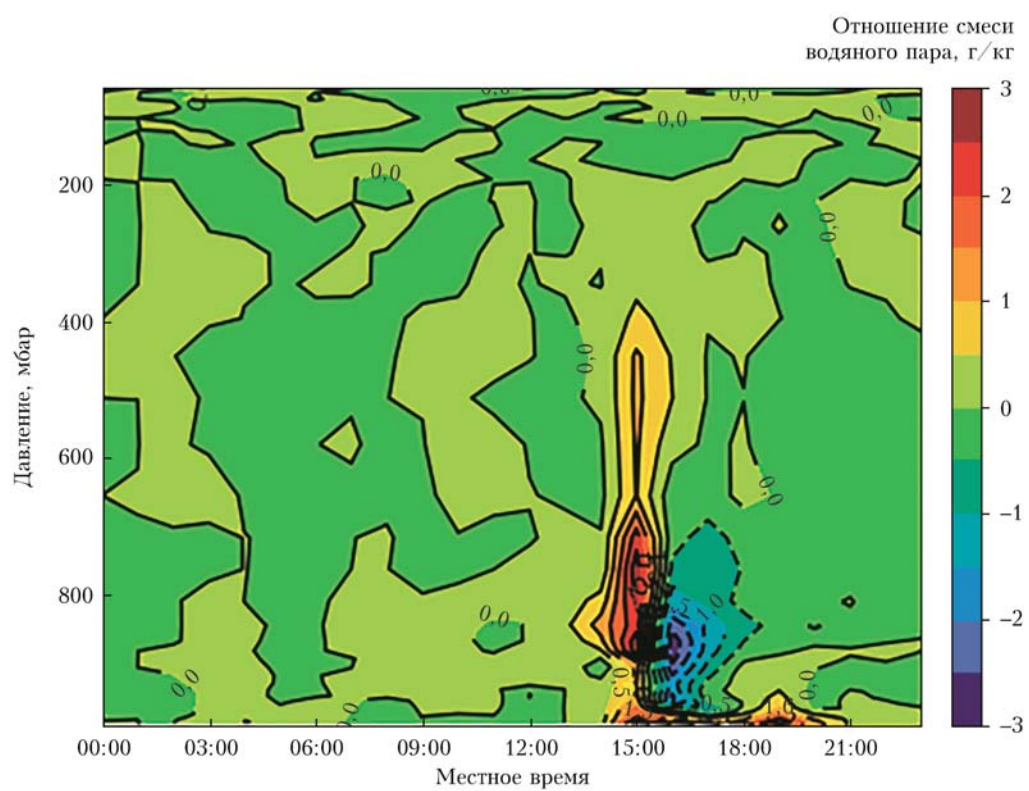


Рис. 2. Временные вариации вертикального профиля содержания водяного пара в точке (55° с.ш., 37° в.д.) 07.07.2022 г.

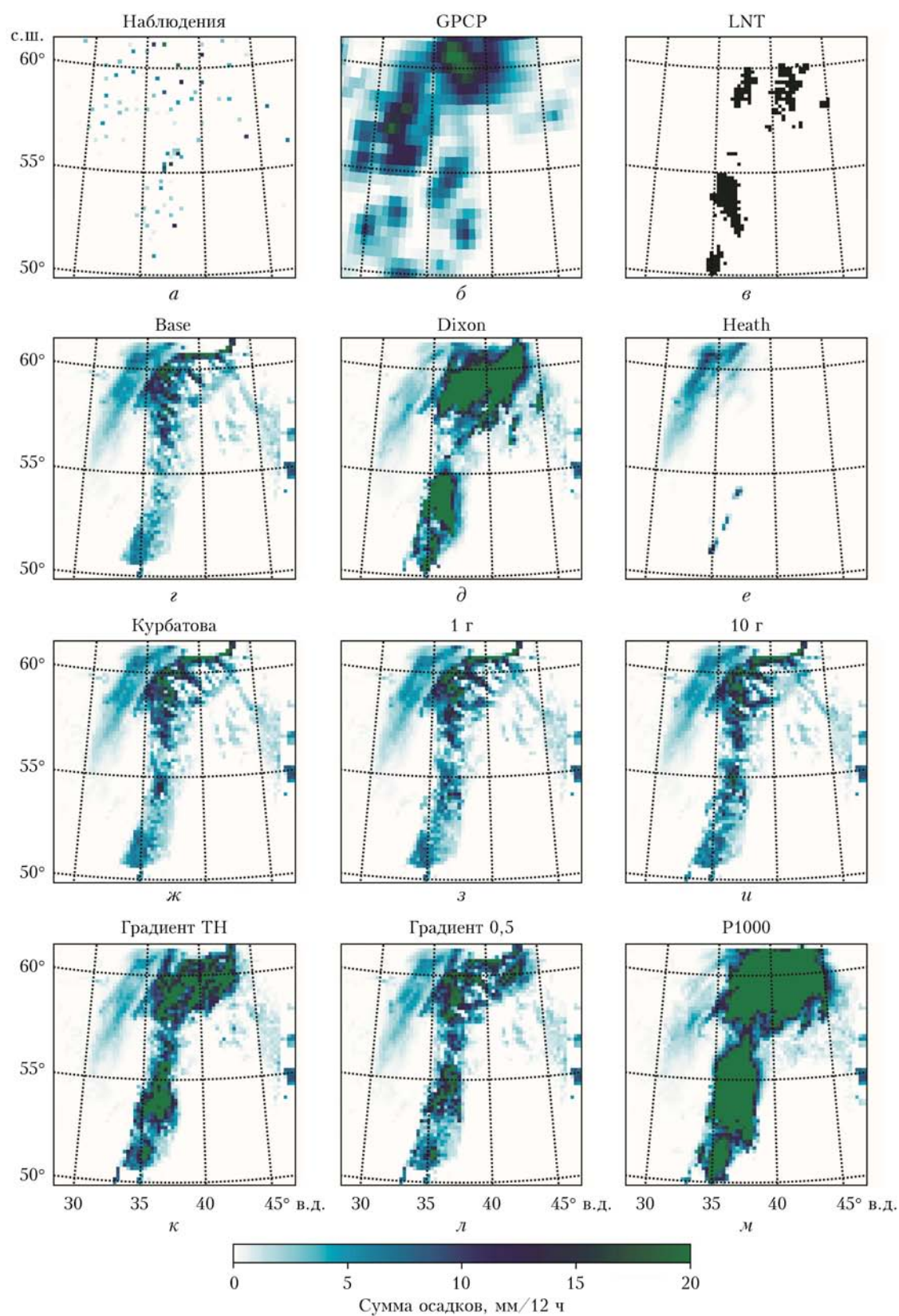


Рис. 3. Суммы осадков за 12 ч (с 03:00 до 15:00) 07.07.2022 г.: наблюдения (*a* — данные синоптических станций, *б* — GPCP); *в* — грозные ячейки в максимум молниевой активности (12 ч); *г–м* — результаты модельных расчетов