

УДК 55.509.52

Эксперименты по усвоению данных сети грозопеленгации

К.Г. Рубинштейн^{1,2}, И.М. Губенко², Р.Ю. Игнатов²,
Н.Д. Тихоненко³, Ю.И. Юсупов^{3*}

¹Гидрометцентр России

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

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН

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

³НПЦ «Мэп Мейкер»

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

Поступила в редакцию 26.04.2019 г.

Проанализированы первые результаты исследования влияния учета данных грозопеленгаторной сети в численном прогнозе погоды. Дан краткий обзор методов учета грозопеленгации в численных моделях прогноза погоды, описан алгоритм использованного нами метода учета данных грозопеленгаторов, представлены результаты численных экспериментов и их анализ для семи прогнозов погоды при наличии гроз в Краснодарском крае. Установлено, что средние абсолютные ошибки для всех величин благодаря учету гроз уменьшаются. Продемонстрирована работа использованной процедуры на примере сравнения карт накопленных суточных осадков для семи прогнозов с учетом и без учета данных сети WWLLN. Показано, что конфигурация полей прогностических осадков и их интенсивность заметно приблизилась к эталонным и в областях, где наблюдались грозы, и в областях их отсутствия. Особенно ярко это прослеживается для осадков слабой интенсивности (0–7 мм).

Ключевые слова: грозы, конвективные осадки, усвоение данных, WRF-ARW, сети грозопеленгации; thunderstorms, convective precipitation, data assimilation, WRF-ARW, lightning detection networks.

Введение

Грозы — яркий пример явления, имеющего конвективную природу. Они могут причинять населению большой ущерб. Так, например, в июле 2016 г. над территорией Москвы и Московской обл. при прохождении мощного конвективного шторма, сопровождавшегося аномально интенсивной молниевой активностью, один человек погиб, 26 пострадало, более 10 домов и свыше 100 автомобилей было повреждено [1]. В мае–июне 2017 г. мощные конвективные явления в Московском регионе унесли жизни 20 человек, а экономический ущерб от разрушений составил около 30 млн. руб. [2]. Даже из этих примеров следует, что задача совершенствования надежности прогноза глубокой атмосферной конвекции важна и актуальна в первую очередь для жителей населенных пунктов, а также для ряда отраслей хозяйства: авиации, сельского хозяйства, автотранспорта, строительства и др.

К настоящему времени не существует надежных алгоритмов для прогноза глубокой конвекции и сопровождающих ее явлений (гроз, ливней, града, порывов ветра и др.). Это отчасти связано с тем, что

физические процессы в атмосфере, определяющие образование и развитие конвективной облачности, недостаточно изучены и не сформулирована их математическая модель [3].

В последние годы за рубежом и в России заметно выросло количество специальных грозопеленгационных наблюдательных сетей, с помощью которых получают информацию о координатах, времени и некоторых физических характеристиках грозового очага — типе разряда (внутриоблачный или «облако–земля»), его знаке, силе тока в канале разряда (кА), времени нарастания тока в канале разряда молнии до пикового значения (мкс), времени уменьшения силы тока от пикового значения до нуля (мкс). Существуют всемирная сеть регистрации молний WWLLN (Worldwide Lightning Location Network) и региональные сети. В России это сети Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО), Высокогорного геофизического института (ВГИ) и др. [4–6].

Для улучшения качества прогноза конвекции применяют различные технологии усвоения данных сетей грозопеленгации в численных прогнозах погоды.

Настоящая работа посвящена анализу наших первых результатов исследования учета данных грозопеленгаторной сети в численном прогнозе погоды. Приведены краткий обзор методов учета грозопеленгации в численных моделях прогноза погоды, описание использованного нами метода учета данных грозопеленгации и проведенных численных эксперимен-

* Константин Григорьевич Рубинштейн (k.g.rubin@yandex.ru); Инна Михайловна Губенко (img0504@yandex.ru); Роман Юрьевич Игнатов (prognostist@gmail.com); Никита Дмитриевич Тихоненко (n.tikhonenko@gismeteo.ru); Юрий Исаакович Юсупов (usupov@gismeteo.ru).

тов, а также анализ результатов прогнозов для семи случаев гроз в Краснодарском крае.

1. Краткий обзор существующих методов учета данных сети грозопеленгации в численных прогнозах погоды

Так как в российской периодике нам не известны работы по учету данных грозопеленгации в численных прогнозах погоды, приведем краткий обзор ряда зарубежных работ в этом направлении.

Приблизительно с 2005–2006 гг. в США, Китае и Греции начались попытки учета данных грозопеленгации в численных моделях прогноза погоды. Можно сказать, что все известные нам работы выполнены на одной из лучших региональных моделей — модели WRF-ARW (США) [7]. Алгоритмы и технология учета данных заметно отличаются друг от друга, но все они положительно влияют на качество прогнозов.

В работе А.О. Fierro и других сотрудников Университета Оклахомы (США) [9, 11] представлены результаты экспериментов по усвоению данных грозопеленгационных сетей для дней, когда наблюдались интенсивные торнадо. Из данных выбирались только случаи гроз с типом разряда «облако — земля». В точках с наблюдавшимися грозами изменялись параметры прогнозируемой конвекции. При этом для создания искусственных данных, которые мы будем называть «прокси-данными», в точках с координатами, близкими к точкам зафиксированных гроз, менялся вертикальный профиль потока скрытого тепла, восстанавливался профиль влажности, характерный для интенсивной конвекции, по данным измерений в областях интенсивной конвекции. Анализировались результаты краткосрочных (на 12 ч) прогнозов. Использовалась модель WRF-ARW с тремя вложенными доменами 9; 3; 1 км и 35 уровнями по вертикали. В результатах экспериментов отмечалось заметное улучшение прогнозов в течение первых 3–5 ч. Анализировались изменения в приземной температуре и горизонтальных компонентах приземного ветра.

В работе сотрудников университета Ланчжоу (Китай) Y. Wang и других сравниваются возможности использования в численном прогнозе данных грозопеленгаторов и метеорологических локаторов [10]. Отмечается, что грозопеленгационные данные значительно менее привязаны к местным особенностям ландшафта и имеют более высокое временное и пространственное разрешение, чем данные метеорологических локаторов. Для использования в численной модели авторы преобразуют данные грозопеленгационной сети в трехмерные «прокси-поля», аналогичные полям отражаемости метеорологического радара, называя этот метод физической инициализацией. В их экспериментах также использовалась прогностическая модель WRF-ARW. Было проведено пять численных экспериментов, один контрольный и четыре с различными способами учета данных о грозах.

Практически во всех экспериментах результаты прогнозов улучшались при учете данных грозопеленгаторов. Показано, что коэффициент корреляции данных грозопеленгационной сети с радарной отражаемостью равен 0,847 [10].

В работе [12] сотрудники Университета г. Афин (Греция) Т.М. Giannaros и других в качестве основы для усвоения данных использовали гипотезу о том, что грозы всегда связаны в атмосфере с интенсивной конвекцией и в модели можно перемещать места и время мелкой и глубокой конвекции за счет внесения изменений в параметризацию Kain–Fritsch [13]. Для прогнозов в [12] использовались модель WRF-ARW и вложенные сетки с разрешением 24 и 6 км и 28 уровнями по вертикали. Было рассчитано восемь прогнозов над территорией Греции для дней с наблюдавшимися интенсивными конвективными явлениями. Для каждого явления было рассчитано три прогноза на 24 ч: контрольный (без учета гроз) и два с разными способами преобразования конвекции. Оценка качества прогнозов проводилась, прежде всего, для осадков. Результаты анализа показали, что во всех случаях при учете данных грозопеленгаторных сетей прогноз осадков заметно улучшался.

Методика [12] была использована и нами, более подробно она описана ниже.

2. Процедура усвоения данных грозопеленгационной сети

Рассмотрим результаты экспериментов по усвоению данных сети грозопеленгации WWLLN, включающей три станции на территории России, с помощью технологии, близкой к приведенной в [13–15].

В основе использованной процедуры усвоения данных лежат две основные гипотезы. Первая заключается в том, что система грозопеленгации фиксирует 100% гроз в расчетной области. И, хотя известно, что система WWLLN фиксирует в среднем только 60–70% грозовых очагов [4], в этих экспериментах нам важно, что в точках, где система зафиксировала молниевые разряды, они точно наблюдались. Поэтому для первого опыта гипотеза о сто-процентной фиксации гроз в нашем регионе вполне допустима. В дальнейшем мы будем пользоваться более густыми и точными региональными сетями грозопеленгации. Вторая гипотеза заключается в том, что в точках, где сеть грозопеленгации не зафиксировала гроз, не было глубокой конвекции. А если она прогнозировалась, то ее целесообразно видоизменить. Это можно сделать двумя способами: или подавить в этих точках любую конвекцию, или наложить мелкую конвекцию вместо глубокой. Результаты экспериментов в [8, 13–15] показали, что лучшие результаты в описании осадков были получены при переходе в таких случаях на мелкую конвекцию.

Данные наблюдений за грозами учитываются в течение первых 24 прогнозов. Принимается, что минимальная толщина облаков для активации глубокой конвекции является функцией температуры

основания облака. Если по данным сети грозопеленгации гроза присутствует в узле сетки, то в этой точке характеристики атмосферы изменялись за счет «прокси-данных», обеспечивающих соответствующую конвекцию. В частности, если для нижней трети облака температура выше или равна 20°C , то его толщина должна быть не менее 6 км с температурой вершины ниже -22°C . В случаях температуры основания облаков менее 20°C толщина облачности должна быть не менее 4 км, а температура верхней границы облаков — -22°C . Эти условия использовались для обеспечения достаточно мощной облачности, где присутствует слой перемешивания, поддерживающий условия для инициирования и развития гроз [16, 17].

Обращение к процедуре учета данных грозопеленгации происходит в узлах расчетной сетки с координатами в квадрате ± 10 км от точки наблюдений. При каждом обращении к процедуре в каждой точке сетки определяется самый неустойчивый слой в столбе атмосферы (НСЛ) как слой с самой высокой влажной статической энергией, и он используется в качестве источника интенсивной конвекции и гроз. Если облако в расчетном узле не соответствует требованиям глубокой конвекции, то в использованной параметризации конвекции в НСЛ добавляется водяной пар итеративно с шагом $0,1$ г/кг на каждом уровне. После каждого добавления влаги проверяется возможность возникновения глубокой конвекции. При возникновении конвекции итерации прекращаются. Если глубокая конвекция не возникает после десяти итераций и добавления 1 г/кг водяного пара в НСЛ, то добавление пара прекращается и слой остается не активированным. Таких случаев почти не наблюдалось. На каждой итерации рассчитывается интеграл абсолютной разницы между начальным и конечным содержанием пара в столбе атмосферы. Если используемая процедура приводит к заметному нарушению баланса массы влаги, то добавление влаги останавливается. Таких случаев также не встречалось.

Как уже указывалось, в ячейках сетки, где грозы не наблюдаются, но глубокая конвекция прогнозировалась, при применении такой параметризации в режиме мелкой конвекции могут прогнозироваться небольшие осадки, когда глубина облака превышает примерно 50 гПа [13].

3. Конфигурация прогностической модели

В качестве прогностической модели использовалась модель WRF-ARW версии 3.9.1 [7]. Прогнозы рассчитывались по области, приведенной на рис. 1 (цв. вкладка), с пространственным разрешением 18 км, которое требует параметризации конвекции. В расчетах применялись следующие параметризации физических процессов: конвекции — Kain—Fritsch; микрофизики облаков — NSSL 2 — moment Scheme with CCN Prediction; радиации — RRTMG

Shortwave and Longwave Schemes; процессов в почве — Unified Noah Land Surface Model; планетарного пограничного слоя — Bougeault—Lacarrere Scheme (BouLac) [7, 13, 18, 19].

4. Анализ результатов

4.1. Анализ изменения со временем вертикальных профилей влажности и температуры

Процедуру можно пояснить с помощью рис. 2 (цв. вкладка), где приведены диаграммы временного хода вертикальных профилей влажности и температуры для точек, в которых наблюдались грозы, в семи примерах прогнозов (48 ч). Также на рисунке представлены разности температуры и влажности с учетом (Б) и без учета (А) грозопеленгаторов. При сравнении А и Б видно, что в нижней части столба атмосферы влажность увеличилась до $1,1$ г/кг (разности в некоторых частях атмосферы доходили до $0,3$ г/кг), особенно в интервале с $6:00$ до $12:00$. В дальнейшем в прогнозе влажность спадала, скорее всего, благодаря осадкам.

В столбе атмосферы интенсивной конвекции заметно изменилась также температура нижней тропосферы. Изотерма 20°C как основание мощных облаков возникла вместо изотермы 10°C , а изотерма -20°C как верхняя граница мощных облаков заметно поднялась (до 10°C). Диаграммы поясняют, что в точках, в которых наблюдались молнии, схема их усвоения работала в соответствии с приведенным выше описанием.

4.2. Анализ абсолютных ошибок прогнозов

Для представления эффекта от учета данных о грозах рассчитывались абсолютные ошибки семи прогнозов на 48 ч в Краснодарском крае летом 2017 г. (31 мая, 7, 22, 23 июня, 20 июля, 22 августа, 23 сентября). Были рассчитаны абсолютные ошибки температуры воздуха и точки росы на 2 м, давления на уровне моря, скорости ветра на 10 м и осадков [20, 21]. Результаты оценок представлены в таблице. Оценки проводились для прогнозов без учета и с учетом усвоения данных сетей грозопеленгации. Карта синоптических станций, по которым рассчитаны оценки, приведена на рис. 1.

В таблице серым обозначены меньшие ошибки для одинаковых сроков. Можно видеть, что средние абсолютные ошибки для всех величин (температуры, давления, ветра и осадков) благодаря учету гроз уменьшаются для определенных сроков. Абсолютная ошибка величин осадков и ошибки в прогнозе давления не уменьшились только для прогноза 20 июля 2017 г. Тем не менее даже в этом случае ошибки в прогнозе приземной температуры, отношения смеси водяного пара и скорости ветра заметно снизились.

Абсолютные ошибки приземных температуры воздуха (°С) и точки росы 2 м (°С), давления на уровне моря (гПа), скорости ветра на 10 м и осадков (мм) в прогнозах без усвоения данных сети грозопеленгаторов и с усвоением

Заблаговременность, ч	31 мая		7 июня		22 июня		23 июня		20 июля		22 августа		23 сентября	
	без усв.	усв.	без усв.	усв.	без усв.	усв.	без усв.	усв.	без усв.	усв.	без усв.	усв.	без усв.	усв.
<i>Приземная температуры воздуха</i>														
0	2,82	2,82	2,39	2,39	2,79	2,79	2,64	2,64	2,04	2,04	1,78	1,78	2,18	2,18
6	2,12	2,04	1,71	1,67	2,16	2,03	2,08	2,03	1,68	2,02	2,19	2,18	1,56	1,84
12	2,25	2,02	1,57	1,63	2,63	1,91	2,95	2,93	4,23	4,52	2,72	2,74	2,97	2,20
24	2,18	2,17	2,14	2,11	2,58	2,77	2,39	2,39	2,46	2,52	2,12	2,12	2,00	1,82
36	2,47	2,45	2,83	2,83	2,49	2,70	2,17	2,51	2,99	2,11	2,05	2,11	3,05	3,11
48	2,80	2,86	2,41	2,41	2,83	2,61	3,03	3,03	1,96	2,02	1,68	1,67	1,86	1,97
Среднее	2,44	2,39	2,18	2,17	2,58	2,47	2,54	2,59	2,56	2,54	2,09	2,10	2,27	2,19
<i>Приземная точка росы</i>														
0	2,77	2,77	2,48	2,48	2,95	2,95	3,25	3,25	3,33	3,33	4,13	4,13	3,34	3,34
6	1,90	1,86	1,60	1,59	2,00	2,25	1,90	1,89	2,16	2,28	2,24	2,19	2,27	2,18
12	2,32	2,38	1,85	1,79	2,80	2,71	2,73	2,79	2,15	2,17	2,16	2,18	1,92	2,03
24	1,51	1,51	1,67	1,66	2,66	2,64	1,45	1,45	1,88	1,91	1,90	1,92	1,83	1,88
36	2,01	2,01	2,10	2,07	2,60	2,59	2,44	2,27	2,09	2,38	1,78	1,57	2,52	2,34
48	3,01	3,06	1,95	1,95	1,80	1,76	2,40	2,36	2,11	2,24	1,91	2,01	2,78	2,40
Среднее	2,25	2,27	1,94	1,92	2,47	2,48	2,36	2,34	2,29	2,39	2,35	2,33	2,44	2,36
<i>Давление на уровне моря, гПа</i>														
0	0,99	0,99	0,64	0,64	0,50	0,50	0,49	0,49	1,08	1,08	0,92	0,92	1,00	1,00
6	0,65	0,65	0,78	0,80	0,99	0,92	0,69	0,68	0,90	0,93	0,75	0,76	0,70	0,73
12	1,08	1,06	0,63	0,65	0,84	0,71	0,86	0,83	1,59	1,62	1,17	1,16	0,85	1,00
24	1,75	1,80	1,08	1,09	0,57	0,55	1,01	0,95	1,25	1,27	0,89	0,81	1,68	1,55
36	0,97	0,96	1,33	1,30	1,20	1,27	3,17	2,25	1,18	1,16	1,28	1,23	1,22	1,11
48	0,82	0,80	0,88	0,93	0,68	0,65	0,98	0,97	0,74	0,93	1,78	1,27	0,69	0,81
Среднее	1,04	1,04	0,89	0,90	0,80	0,77	1,20	1,03	1,12	1,17	1,13	1,03	1,02	1,03
<i>Модуль скорости ветра на 10 м</i>														
0	1,28	1,28	1,49	1,49	1,70	1,70	1,56	1,56	1,55	1,55	1,99	1,99	2,44	2,44
6	1,40	1,42	1,62	1,60	1,88	1,98	1,86	1,84	1,49	1,70	2,58	2,66	2,63	2,68
12	1,10	1,08	1,27	1,29	1,82	2,13	1,73	1,76	2,19	2,24	1,89	1,87	2,31	2,10
24	1,68	1,72	1,45	1,45	1,30	1,27	2,54	2,54	1,85	1,92	1,73	1,74	2,39	2,07
36	1,78	2,11	1,07	1,07	1,50	1,45	4,32	2,69	2,14	1,52	2,07	1,96	1,95	1,94
48	1,54	1,55	1,94	1,88	2,43	2,38	1,75	1,74	2,39	2,47	1,82	1,99	2,15	2,21
Среднее	1,46	1,53	1,47	1,46	1,77	1,82	2,29	2,02	1,94	1,90	2,01	2,04	2,31	2,24
<i>Осадки</i>														
12	0,16	0,10	0,20	0,18	0,00	0,00	5,75	4,89	0,33	0,18	0,12	0,00	0,05	0,02
24	4,73	3,80	0,55	0,37	0,62	0,46	1,12	1,47	0,16	0,46	3,56	2,10	0,34	0,28
36	1,32	1,48	0,12	0,01	0,02	0,02	0,22	0,21	0,00	0,00	5,30	1,28	0,32	0,12
48	2,07	1,79	0,29	0,19	0,31	0,24	2,36	2,19	0,17	0,11	0,11	0,03	0,64	0,56
Среднее	0,16	0,10	0,20	0,18	0,24	0,18	2,36	2,19	0,17	0,19	2,27	0,85	0,34	0,25

4.3. Анализ полей осадков за 12 ч для семи прогнозов без учета и с учетом данных сети грозопеленгации

На рис. 3 (цв. вкладка) приведены карты семи прогнозов осадков для Краснодарского края без учета (слева) и с учетом (справа) гроз. На этих картах заливкой нанесены прогнозы осадков, полученные в модели, а изолиниями в качестве эталона — суточные данные ГРСР [22]. В левом столбике видно, что конфигурация полей слабых осадков 0–7 мм не соответствует эталону и занимает значительно большую территорию. Переход от глубокой кон-

векции к мелкой в результате использования процедуры учета данных о грозах во всей области, где не наблюдались грозы (белые поля справа), позволил заметно приблизить конфигурацию прогностических осадков к данным наблюдений. Эта тенденция прослеживается во всех семи прогнозах.

Рассмотрим область, в которой в течение анализируемых суток наблюдались грозы, по данным грозопеленгаторной сети WWLLN. Видно, что и в этих случаях конфигурация полей осадков и их интенсивности заметно приблизились к эталонным, даже в областях, удаленных от основных зон гроз, например 31 мая и 7 июня, когда утром возник небольшой прогнозируемый очаг интенсивных осадков. В эти

дни за счет правильного усвоения данных скорректировалась область отсутствия осадков в центре исследуемой территории. Большая степень развития мелких очагов на севере области наблюдалась 22 июня — эти очаги не были описаны в прогнозе без учета данных грозопеленгационной сети и приблизились к эталонным данным после учета. В прогнозе 23 июня на севере, в западной части и в центре области конфигурация карт прогнозов осадков приблизилась к эталонам; 20 июля несколько меньше, чем в остальных прогнозах, уменьшилась область слабых осадков — в основном на северо-востоке и юге области; 22 августа конфигурация слабых осадков также была близка к эталону. Поля интенсивных осадков при учете данных о грозах заметно ближе к данным наблюдений на северо-западе и юге области. И, наконец, случай 23 сентября: конфигурация слабых осадков заметно приблизилась к данным наблюдений. В точке с наблюдавшейся грозой посреди области возникла интенсивная конвекция с осадками, которые не были подтверждены эталонном. В остальных областях, в которых были зафиксированы грозы, конфигурация областей с прогнозными осадками стала ближе к эталону. На наш взгляд, эти результаты являются новыми и важными.

Заключение

В статье впервые для российской научной периодики приведен краткий обзор работ по усвоению наблюдений за грозами в численном прогнозе погоды.

Описана процедура усвоения данных грозопеленгаторных сетей. В точках, где наблюдались молнии, на графиках временного хода профилей влажности и температуры проанализированы изменения, вносимые процедурой усвоения. Приведены оценки абсолютной ошибки приземных температур, влажности, давления, скорости ветра на 10 м и осадков по Краснодарскому краю для семи прогнозов, в течение которых наблюдались интенсивные грозы. Установлено, что средние абсолютные ошибки для всех величин для определенных сроков благодаря учету гроз уменьшаются. Продемонстрирована работа использованной процедуры на примере сравнения карт накопленных суточных осадков для семи прогнозов с учетом и без учета данных сети WWLLN. Показано, что конфигурация полей прогностических осадков и их интенсивность заметно приблизились к эталонным как в областях, где наблюдались грозы, так и в областях их отсутствия. Особенно ярко это прослеживается для осадков слабой интенсивности (0–7 мм).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № А 19-05-00047 и мол_а 18-35-00044).

1. Белов Д. Гроза в Москве 13 июля 2016: Пользователей сети покорили вспышки молний в столице [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metroneews.ru/ovosti/moscow/reviews/groza-v-moskve-13-iyulya-2016-polzovateley-seti-pokorili-vspyski-molnii-v-stolice-1194538> (дата обращения: 25.07.2016).
2. *Regnum*: Ливни и грозы в Москве и регионах: фоторепортажи онлайн [Электронный ресурс]. URL: <https://egnum.ru/news/2295016.html> (дата обращения: 17.07.2017).
3. Довгало Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А. Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. СПб.: Моби Дик, 2013. Вып. 2. 220 с.
4. Lay E.H. Investigating lightning-to-ionosphere energy coupling based on VLF lightning propagation characterization: PhD Thesis. Seattle: University of Washington, 2008. 26 p.
5. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О. Система грозопеленгации на Северном Кавказе // Метеорол. и гидрол. 2013. № 1. С. 5–11.
6. Снегуров А.В., Снегуров В.С. Экспериментальная грозопеленгационная система // Тр. ГГО. 2012. Вып. 567. С. 188–200.
7. Skamaroch W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.Yu., Wang W., Powers J.G. A description of the Advanced Research WRF Version 3. National Center of Atmospheric Research: Boulder, Colorado, 2008. 113 p.
8. Hakim G.J., Reguluski P., Mass C., Torn R.D. Lightning data assimilation using an ensemble Kalman filter // Extended Abstracts of the 20th Int. Lightning Detection Conf. Norman, Oklahoma, USA. October, 2014. P. 3683–3695.
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. Wang Y., Yang Y., Liu D., Zhang D., Yao W., Wand C. A case study of assimilating lightning-proxy relative humidity with WRF-3DVAR // Atmosphere. 2017. V. 8, N 55. P. 1–20.
11. Dixon K., Mass C.F., Gregory J.H., Robert H. The impact of lightning data assimilation on deterministic and ensemble forecasts of convective events // J. Atmos. Ocean. Technol. 2016. V. 33. P. 1801–1823.
12. 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.
13. Kain J.S. The Kain–Fritsch convective parameterization: An update // J. Appl. Meteorol. 2004. V. 43, N 1. P. 170–181.
14. Mansell E.R., Ziegler C.L., MacGorman D.R. A lightning data assimilation technique for mesoscale forecast models // Mon. Weather Rev. 2006. V. 135. P. 1732–1748.
15. Lagouvardos K., Kotroni V., Defer E., Bousquet O. Study of a heavy precipitation event over southern France, in the frame of HYMEX project: Observational analysis and model results using assimilation of lightning // Atmos. Res. V. 134. P. 45–55.
16. Bruning E.C., Weiss S.A., Calhoun K.M. Continuous variability in thunderstorm primary electrification and an evaluation of inverted-polarity terminology // Atmos. Res. 2014. V. 135. P. 274–284.
17. 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, N 1. P. 171–194.
18. Ek M.B., Mitchell K.E., Lin Y., Rogers E., Grunmann P., Koren V., Gayno G., Tarpley J.D. Imple-

- mentation of NOAA land surface model advances in the NCEP operational mesoscale Eta model // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N 22. P. 8851.
19. *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.
 20. *РД 52.27.284-91.* Руководящий документ. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов. М.: Комитет Гидрометеорологии при Кабинете Министров СССР, 1991. 149 с.
 21. *Хромов С.П., Мамонтова Л.И.* Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
 22. *Harold F. Pierce:* Global Precipitation Analysis [Electronic resource]. URL: <https://precip.gsfc.nasa.gov/> (last access: 11.11.2018).

K.G. Rubinstein, I.M. Gubenko, R.Yu. Ignatov, N.D. Tikhonenko, Yu.I. Yusupov. **Experiments on lightning detection network data assimilation.**

The work is devoted to the analysis of our first results about the impact of lightning data assimilation on the numerical weather forecast. We present a brief overview of the methods for lightning data assimilation in weather prediction models, a description of the algorithm used, and the results of numerical experiments on convective storms over Krasnodar region, Russia, observed in 2017. It is found that the average absolute errors are reduced. It is shown that the configuration of prognostic precipitation fields and their intensity is much closer to the observations. This is especially clearly seen for light precipitation (0–7 mm).

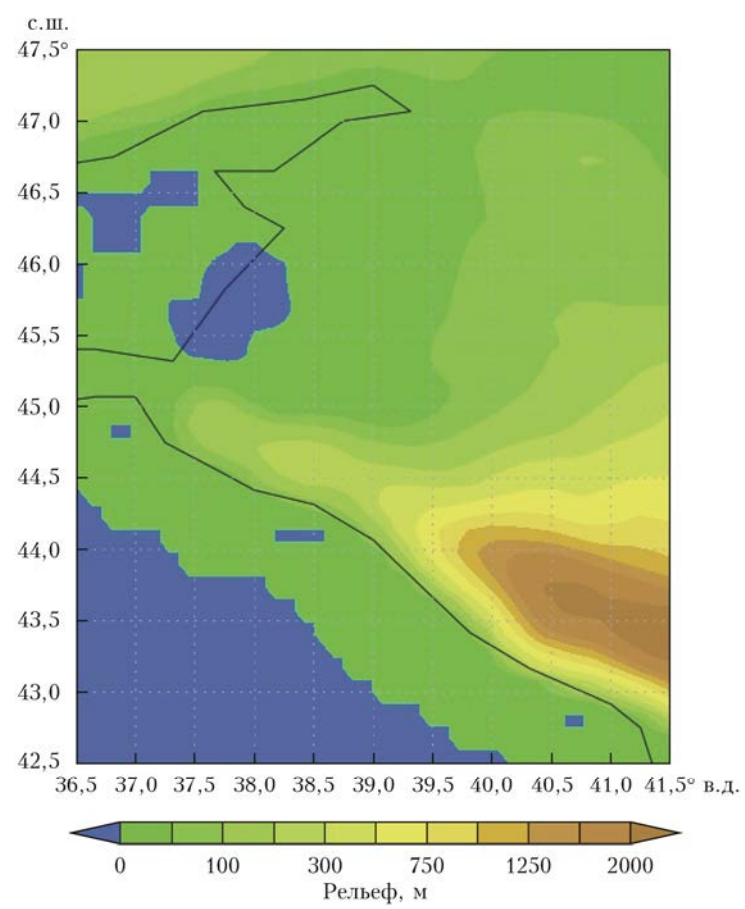


Рис. 1. Карта высот области расчетов прогнозов

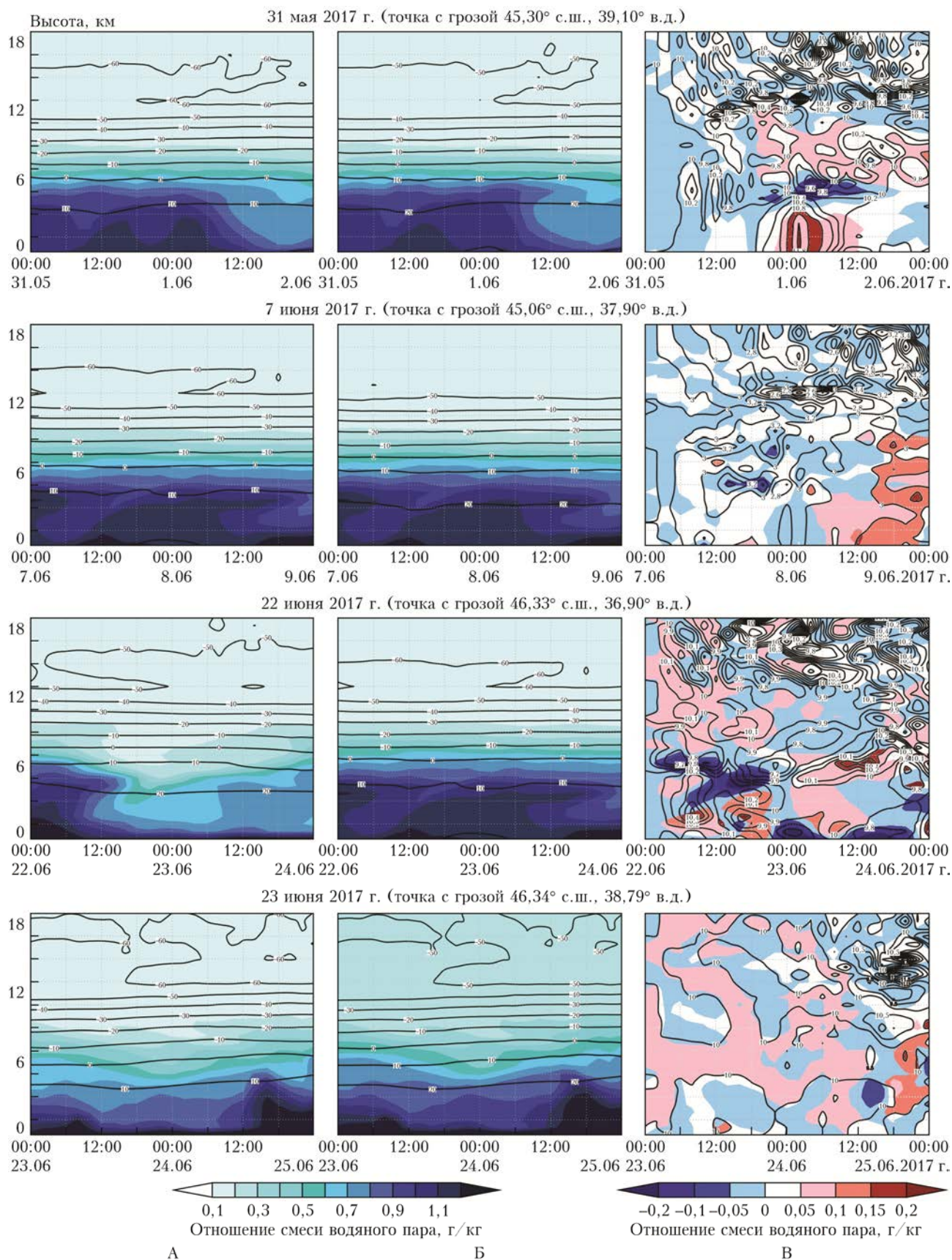


Рис. 2. Временной ход вертикальных профилей температуры и влажности и их разности в точках с наблюдавшимися молниями: заливка — прогноз отношения смеси водяного пара, г/кг; изолинии — прогноз температуры воздуха, °C: А — без усвоения, Б — с усвоением данных грозопеленгации, В — разность хода (с усвоением — без усвоения данных).
Прогноз от 00:00 UTC

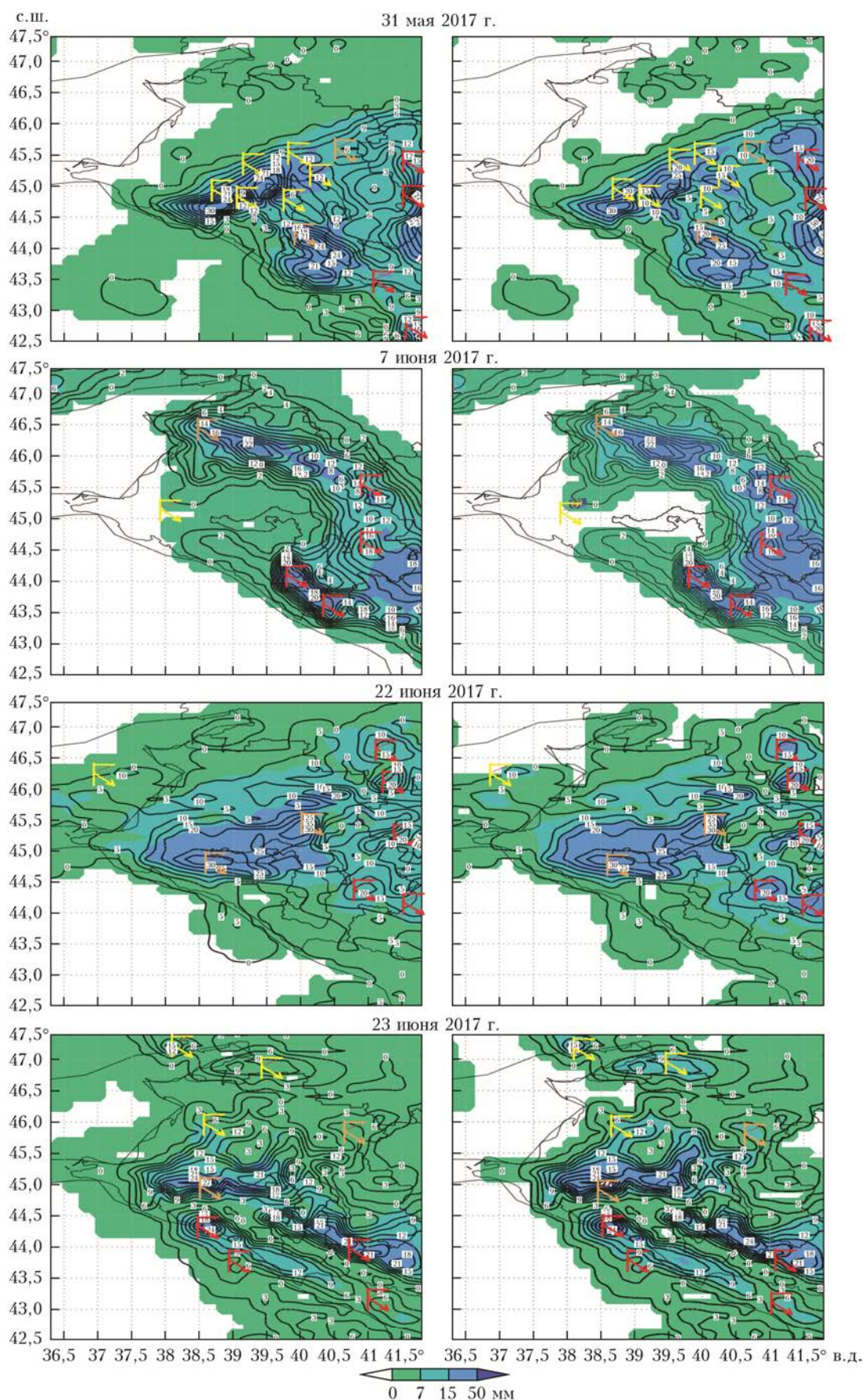


Рис. 3. Прогнозы накопленных осадков за 24 ч без усвоения (слева) и с усвоением данных грозопеленгации (справа): заливка — осадки; изолинии — эталонные осадки GPCP [22]; значки — гроза по данным сети WWLLN (0–8 ч (желтый), 9–15 ч (бежевый), 16–24 ч (красный) в течение суток) [4]

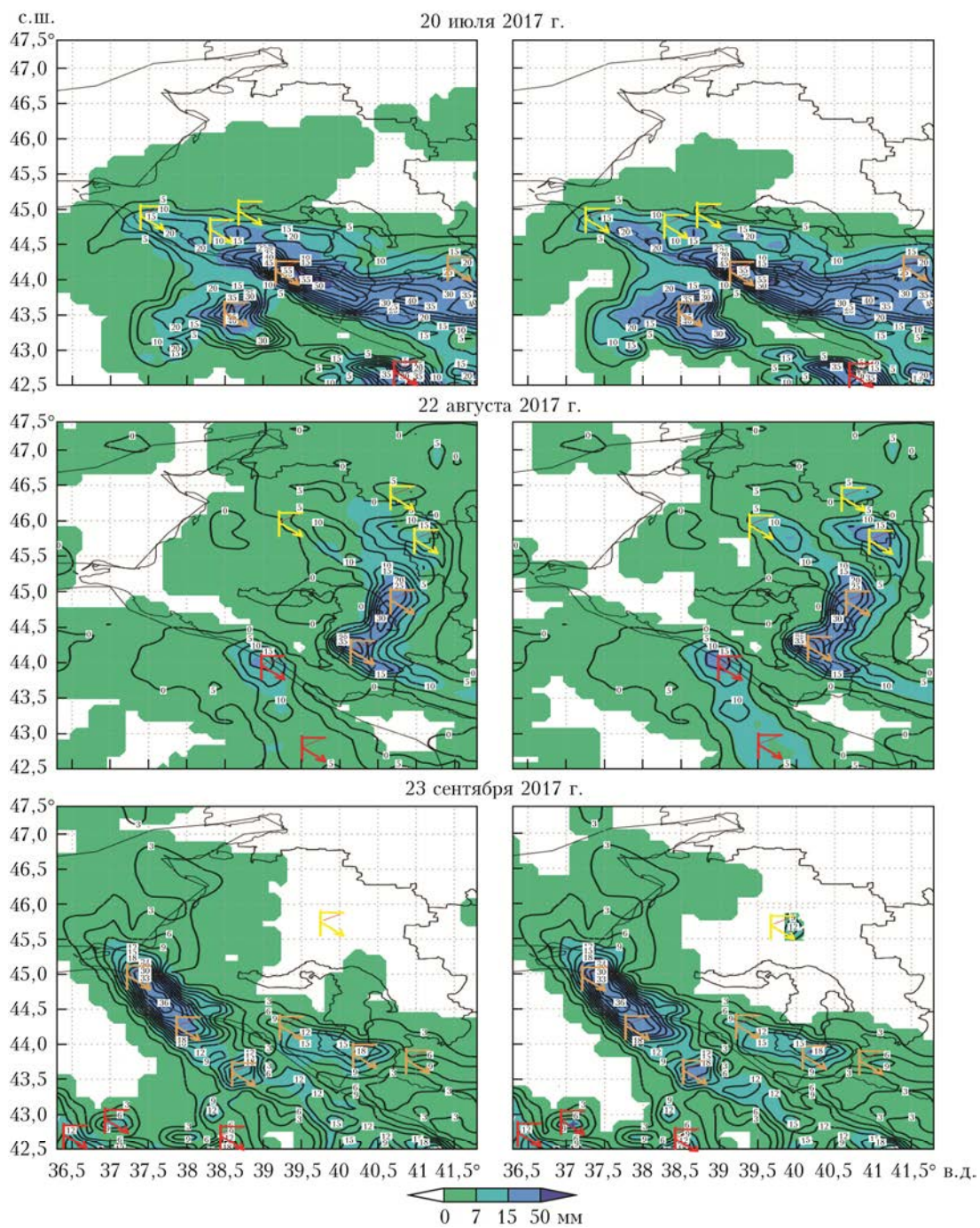


Рис. 3. Окончание