

УДК 551.509.5

Оценка прогноза сильных осадков по данным оперативной глобальной модели атмосферы ПЛАВ20

С.В. Травова¹, М.А. Толстых^{2,1}, В.В. Шашкин^{2,1}

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*²Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука, г. Москва, Россия
makhnorylova@gmail.com*

В статье анализируются прогнозы сильных осадков, выпадающих одновременно на территории с характерным масштабом порядка 100 км по данным оперативной глобальной модели атмосферы ПЛАВ20. Эти прогнозы оцениваются за большую часть летнего периода 2019 г. на некоторых территориях России, находящихся в зоне потенциальных паводковых наводнений. Отдельно рассмотрены оценки прогнозов сильных осадков в дни, предшествующие затоплению рассматриваемых регионов. Анализ показал, что прогноз сильных осадков с заблаговременностью до трех суток, в отдельных случаях до пяти суток, можно считать успешным.

Ключевые слова: атмосферные осадки, численный прогноз погоды, прогноз сильных ливней, глобальная модель атмосферы, оценка детерминированного прогноза осадков

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-96-112>

Verification of heavy precipitation forecasts of the SL-AV20 global operational atmosphere model

S.V. Travova¹, M.A. Tolstykh^{2,1}, V.V. Shashkin^{2,1}

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

*²Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian
Academy of Sciences, Moscow, Russia
makhnorylova@gmail.com*

The SL-AV20 operational global atmosphere model forecasts of heavy precipitation simultaneously falling on the territory with a typical size of about 100 km are analyzed. These forecasts are verified for most of the 2019 summer period for some territories situated in the zones of potential floods. The skill scores of heavy precipitation forecasts for the days preceding the floods in the analyzed regions are considered separately. The analysis revealed that the heavy precipitation forecasts with the lead time to three days (in some cases, to five days) can be considered successful.

Keywords: precipitation, numerical weather prediction, heavy precipitation forecast, global atmosphere model, verification of deterministic precipitation forecast

Введение

С 2010 года глобальная модель общей циркуляции атмосферы ПЛАВ2008 (ПолуЛагранжева, основанная на уравнении Абсолютной заВихренности) [15] является основным численным методом глобального

среднесрочного прогноза погоды ФГБУ «Гидрометцентр России». Модель была разработана в конце 90-х годов XX века – начале XXI века, ее главным элементом является оригинальный блок решения уравнений динамики атмосферы [14, 15, 18, 34]. В 2016 году после оперативных испытаний внедрена новая версия этой модели – ПЛАВ20, имеющая горизонтальное разрешение 0,225 градусов по долготе, 0,16–0,24 градуса по широте (в Северном полушарии разрешение выше, чем в Южном), 51 уровень по вертикали. Наряду с оригинальным блоком решения уравнений динамики атмосферы, в ней используются алгоритмы описания процессов подсеточного масштаба, разработанные консорциумом по мезомасштабному прогнозу погоды ALADIN/LACE под руководством Ж.-Ф. Желена [33], исключение составляют параметризации коротковолновой радиации CLIRAD-SW [21, 32] и длинноволновой радиации RRTMG LW [29]. Для параметризации микрофизических процессов неконвективного характера применяются алгоритмы, разработанные консорциумом RC-LACE ([25], части 1 и 3 раздела 2). Конвективные осадки рассчитываются с помощью алгоритма потока массы [20] с многочисленными усовершенствованиями [23]. Более подробное описание модели приводится в [15]. Некоторые результаты применения модели ПЛАВ приведены в [17, 19].

В последнее время в оперативную модель ПЛАВ20 были внесены некоторые модификации, в том числе в описание процессов образования осадков. Результаты среднесрочных прогнозов полей в свободной атмосфере с такой версией модели проанализированы в [16]. Потребовалось также заново провести оценку полей осадков. Особый интерес представляет анализ качества прогноза сильных дождей, так как зачастую они приводят к крупным паводкам. Представление таких явлений является сложной задачей, поскольку они могут иметь внутригодовую изменчивость, центры таких осадков могут быть совсем небольших размеров и интенсифицироваться непоследовательно во времени. Особенно сильно это сказывается в случае среднесрочных и долгосрочных прогнозов [13, 27]. Глобальная модель атмосферы ПЛАВ20 имеет горизонтальное разрешение около 15–20 км над территорией России, поэтому не может представлять конвективные осадки явным образом. Эта особенность алгоритма может приводить к ошибкам прогноза внутримассовой облачности вертикального развития, но не так сильно сказывается в случае фронтальной. Вклад конвективной составляющей осадков в модельных прогнозах можно оценить отдельно от остальных. Однако идентифицировать условия образования осадков по данным наблюдений наземных метеостанций в автоматическом режиме без привлечения дополнительных источников информации довольно сложно. В связи с этим, как правило, верифицируются суммарные осадки всех видов [11]. В данной работе в дополнение к таким оценкам был проведен анализ четырех ситуаций, в которых заведомо известно о выпадении крупномасштабных осадков и наличии затопленной конвекции.

Методика оценки прогноза сильных летних осадков на выделенных территориях

Существуют различные методики верификации численного прогноза осадков в зависимости от имеющихся данных наблюдений на исследуемой территории, а также целей таких оценок [22, 26, 28]. Согласно рекомендациям ВМО [11], численные прогнозы осадков следует верифицировать, используя суммы за 24 ч с пороговыми значениями 1, 10 и 50 мм по данным метеорологических приземных наблюдений в коде SYNOP. В этом методе градацию 10–50 мм/24ч можно считать сильными осадками. Именно этот подход был выбран как основной. Он имеет ряд недостатков. Во-первых, согласно [8], метеорологические станции на территории Российской Федерации передают информацию об измеренных полусуточных осадках дважды в сутки в установленные сроки согласно предписанной для них метеозоне. В России существует пять таких метеозон с различными границами метеорологических суток. В результате этого информация об осадках поступает не только в основные (00, 06, 12 и 18 ч ВСВ), но и в дополнительные синоптические сроки (03, 09, 15, 21 ч ВСВ). В таком случае, для полноценной оценки качества прогноза в любом регионе Российской Федерации, необходимо иметь модельные прогнозы осадков с шагом 3 ч и менее. Во-вторых, дискретные стационарные данные не всегда являются репрезентативными в силу своей большой разреженности. В связи с этим ошибка прогноза местоположения осадков на несколько километров может критическим образом отразиться на результатах оценки.

Для преодоления первого недостатка нами рассматриваются только те случаи, которые происходили в регионах Российской Федерации с измерением количества осадков в основные синоптические сроки. Для преодоления второго, кроме постанционной оценки, приводится осредненный показатель прогноза количества осадков по исследуемой области.

Оценка качества проводилась для серии прогнозов с начальных данных 00 и 12 ч ВСВ в период 06.06–31.07.2019 г. по четырем районам азиатской части России, где в последние годы отмечались сильные наводнения, сопровождавшиеся большим материальным ущербом:

- 1) Забайкальский край, район р. Шилка (51–53° с. ш., 113–118° в. д.);
- 2) Амурская область, район р. Селемджа (50–54° с. ш., 127–134° в. д.);
- 3) Иркутская область, район рек Ия и Уда (53–57° с. ш., 97–104° в. д.);
- 4) Иркутская область, район р. Солзан (50–53° с. ш., 102–106° в. д.).

Для оценки прогноза сильных осадков модели ПЛАВ20 во всех вышеперечисленных случаях были выбраны данные регулярных измерений наземных метеорологических станций, расположенных либо в зоне будущего подтопления, либо выше по течению рек. Суточные суммы осадков были получены путем суммирования полусуточных сумм для каждой станции за соответствующие 24 ч, а затем разбиты по градациям (с верхней границей включительно): 0–1 мм/24ч, 1–10 мм/24ч,

10–50 мм/24ч, более 50 мм/24ч. Для каждой градации была построена таблица сопряженности и рассчитаны оценки качества согласно [12, 35]. Анализ производился по факту выпадения осадков либо их отсутствия в отдельности для каждой градации. Значения модельных данных в точках станций получены методом билинейной интерполяции.

Результаты анализа прогнозов сильных осадков

В табл. 1 представлены оценки прогнозов осадков всех видов (внутримассовых и фронтальных) модели ПЛАВ20 для интенсивности 10–50 мм/24ч за период 06.06–31.07.2019 г.

Таблица 1. Оценка качества прогноза сильных осадков по данным глобальной модели атмосферы ПЛАВ20 за период 06.06–31.07.2019 г.

Table 1. Verification of heavy precipitation forecast by the global atmosphere model SL-AV20 for the period of 06.06–31.07.2019

Название региона (время старта прогнозов) N	Заблаговременность прогноза, ч	G / N _G	PC	FAR	Ur	Hr	Bias	Fr	TS	ETS
Забайкальский край, район р. Шилка (00 ВСВ) 757	24	10.1-50.0 58	0.926	0.462	0.759	0.241	0.449	0.017	0.2	0.177
	48		0.905	0.64	0.690	0.310	0.862	0.046	0.2	0.164
	72		0.894	0.762	0.828	0.172	0.724	0.046	0.111	0.078
Амурская обл., район р. Селемджа (12 ВСВ) 399	24	10.1-50.0 89	0.867	0.210	0.450	0.551	0.700	0.042	0.480	0.399
	48		0.807	0.409	0.562	0.438	0.742	0.087	0.336	0.240
	72		0.757	0.563	0.685	0.315	0.719	0.116	0.224	0.124
Иркутская обл., район рек Ия и Уда (12 ВСВ) 745	24	10.1-50.0 106	0.878	0.428	0.453	0.547	0.953	0.067	0.389	0.324
	48		0.843	0.551	0.574	0.453	1.009	0.092	0.291	0.219
	72		0.808	0.691	0.717	0.283	0.915	0.105	0.173	0.102
Иркутская обл., район р. Солзан (00 ВСВ) 683	24	10.1-50.0 116	0.829	0.506	0.655	0.345	0.698	0.072	0.255	0.182
	48		0.811	0.577	0.690	0.310	0.733	0.086	0.218	0.143
	72		0.799	0.6	0.640	0.362	0.905	0.111	0.235	0.150

Примечание. N – общее количество случаев всех интенсивностей; G – градации интенсивностей осадков, мм/24ч; N_G – количество случаев рассматриваемой градации.

Цветом выделены показатели, чья величина колеблется от 0 до 1. Красным отмечены те характеристики, значение которых в идеальном прогнозе равно 1, а синим цветом отмечены аналогичные критерии, для которых идеальным значением является 0. В качестве показателей

качества прогноза выбраны: PC (proportion correct) – общая оправдываемость прогноза каждой градации; FAR (false alarm ratio) – доля ложных тревог в прогнозе наличия осадков каждой градации; Ur (undetected error rate) – доля пропущенных явлений при прогнозе отсутствия осадков каждой градации; Hr (hit rate) – предупрежденность факта наличия осадков каждой градации; Fr (false alarm rate) – доля ложных тревог при отсутствии осадков каждой градации; Bias – отношение количества спрогнозированных явлений к наблюдаемым (в идеальном прогнозе равен 1). TS (threat score) – критерий качества, альтернативный PC, который не учитывает вклад прогноза отсутствия явления, если оно не наблюдалось. Он гораздо показательнее в случае, когда событие довольно редкое. В идеальном прогнозе значение этого критерия равно 1 и уменьшается с увеличением ложных тревог и неспрогнозированных явлений. ETS (equitable threat score) – показатель успешности с учетом случайных прогнозов (неполный аналог критерия надежности Н.А. Багрова [12]). В случае $ETS < 0$ представленный прогноз является бесполезным.

Прогноз сильных осадков 10–50 мм/24ч гораздо успешнее прогноза экстремальных осадков с интенсивностью более 50 мм/24ч и сохраняет свою полезность до трех суток для всех рассмотренных территорий. По совокупности критериев наилучшие оценки прогноза с заблаговременностью 72 ч получены в Амурской и Иркутской (район р. Солзан) областях. Высокие значения PC и невысокие Fr говорят о хорошем прогнозе отсутствия осадков рассматриваемой градации. В прогнозе отсутствия осадков высока по всем регионам доля пропущенных явлений ($Ur > 0,64$), а в прогнозе наличия осадков – ложных тревог ($FAR > 0,56$). Учитывая, что доля прогноза явлений там, где они были (Hr), с заблаговременностью 3 сут составляет 0,36 и менее, а ошибка смещения $Bias > 0,7$ характеризует количество спрогнозированных явлений близким к наблюдаемым, можно предположить, что зачастую ошибочен прогноз местоположения очагов сильных осадков. Несмотря на это критерии успешности прогноза TS и ETS больше нуля и показывают, что прогноз осадков с заблаговременностью 72 ч для рассматриваемых территорий полезен.

Для 24 и 48 ч наилучшие оценки получены для Амурской и Иркутской (район р. Ия и р. Уда) областей. Для них характерны наибольшее количество точных прогнозов факта выпадения осадков (Hr) градации 10–50мм/24ч и наименьшее количество ложных тревог при прогнозах наличия осадков (FAR), а также минимальное количество пропущенных явлений при прогнозе отсутствия осадков (Ur) и ошибка смещения (Bias), близкая к единице. Успешность прогнозов подтверждается значениями комплексных критериев TS и ETS. В указанных районах они самые высокие для заблаговременностей 24 и 48 часов.

Отметим, что с увеличением последней полезность прогнозов стремительно падает. Так, для трех из четырех регионов TS уменьшается

почти в два раза для 72 ч прогноза относительно 24 ч прогноза, а ETS – в два с половиной – три раза (табл. 1).

Осадки интенсивностью более 50 мм/24ч довольно редкое явление, и максимальная выборка по ним составила 11 случаев за весь рассматриваемый период. В связи с ненадежностью выводов, сделанных по такому количеству данных, расчеты показателей качества здесь не приводятся. Отметим, что общая оправдываемость РС прогноза наличия либо отсутствия этого явления высока (более 97 %) за счет довольно точного прогноза последнего (Fg менее 1 %).

Оценка прогноза сильных осадков в предпаводочных ситуациях

Оперативная версия модели ПЛАВ20 имеет горизонтальное разрешение в средних широтах порядка 20 км [16]. В силу этого, представляет интерес качество ее прогнозов крупномасштабных продолжительных осадков (фронтальных и конвективных внутрифронтальных), связанных с процессами синоптического масштаба, которые могут быть явно разрешены моделью [30] и на оценку которых доступное разрешение модели будет оказывать не такое сильное влияние, как, скажем, в случае внутримассовых локальных конвективных явлений.

Довольно часто крупномасштабные сильные осадки приводят к наводнениям либо их усугубляют и сопровождаются большим экономическим ущербом [2, 5, 10]. Состояние почвы, температура и влажность воздуха также влияют на интенсивность гидрологических процессов. Но осадки во многом являются определяющим метеорологическим фактором [4]. Так, в июле 2018 г. затяжные ливневые дожди совместно со снеготаянием в горах привели к одному из выдающихся паводков в истории Забайкальского края [3]. Осадки были связаны с малоподвижным тропосферным циклоном. Максимальное количество влаги, по данным наблюдений, выпало в период 07–08.07.2018 г. при прохождении фронтальной системы, связанной с этим циклоном, после чего произошел быстрый подъем воды в реках и начался паводок.

24–26 июня 2019 г. сильные ливни в Иркутской области, сопутствовавшие фронтальной системе (и в частности, согласно синоптическому анализу Гидрометцентра России, фронту окклюзии по типу теплого, рис. 1а), привели к переувлажнению почвы и первой волне небывалого паводка на реках Ия, Уда, Бирюса. Были затоплены многие населенные пункты, больше всего из которых пострадали г. Тулун и г. Нижнеудинск [1]. На спутниковых снимках аппарата MODIS можно выделить гряды внутрифронтальных кучево-дождевых облаков в области будущего максимума выпадения осадков (рис. 1б). Этот факт наглядно демонстрирует, что в полной мере отделить крупномасштабные осадки от конвективных невозможно, так как последние могут быть частью первых.

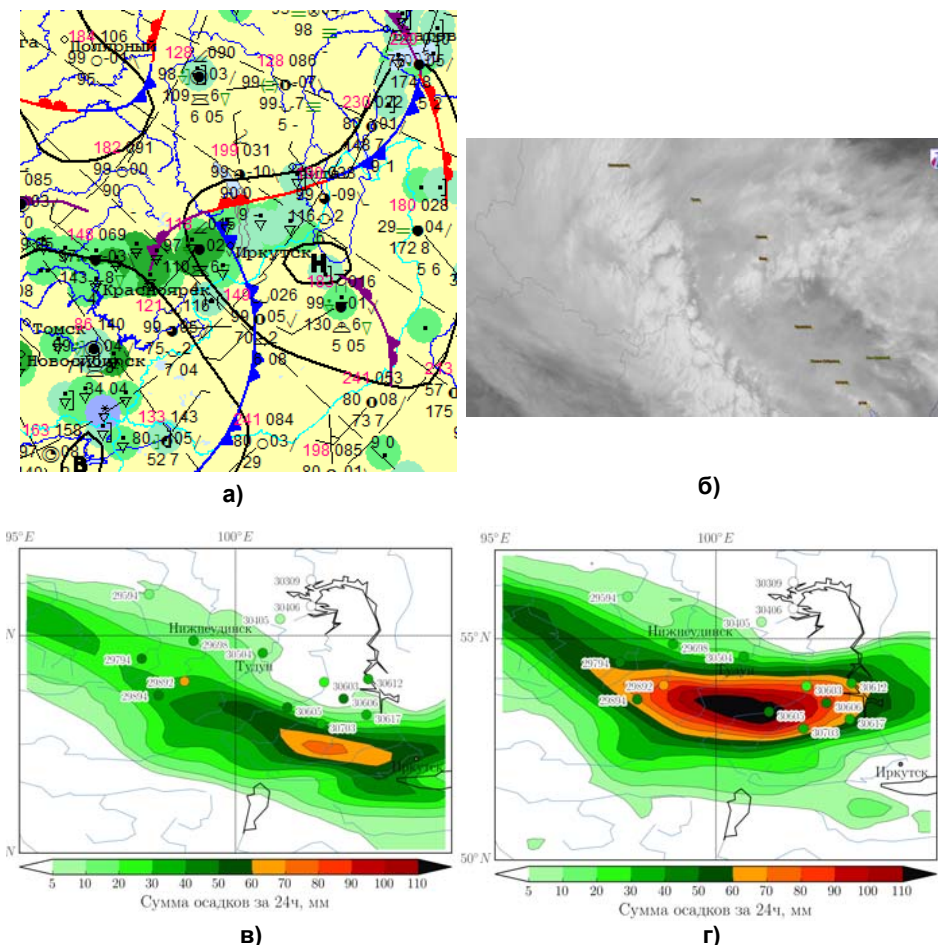


Рис. 1. Комплексный анализ прогноза осадков ПЛАВ20 для Иркутской области, района р. Ия и р. Уда 25.06.2019 г.: синоптическая карта за 00 ч ВСВ 25.06.2019 г. (а) (источник – ФГБУ «Гидрометцентр России»); композитный спутниковый снимок облачности в ИК-диапазоне аппарата MODIS за 24.06.2019 г. (б) (источник – ФБУ «Авиалесохрана»); прогностические поля осадков ПЛАВ20 на 12 ч ВСВ 25.06.2019 г. с заблаговременностью 72 ч (в) и 96 ч (г).

Fig. 1. Comprehensive analysis for precipitation forecast produced by SL-AV20 for Irkutsk region, area of rivers Iya and Uda, 25.06.2019: synoptic analysis for 00 UTC 25.06.2019 (a) (source - Hydrometcenter of Russia); satellite IR MODIS composite cloudiness for 24.06.2019 (б) (source - <https://aviales.ru>); SL-AV20 precipitation forecast valid at 12UTC 25.06.2019 with the lead time of 72 hours (в) and 96 hours (г).

В этом же регионе 27–28 июля 2019 г. сильные ливневые дожди, сопутствовавшие центру углублявшегося циклона, спровоцировали наводнение, вызванное резким подъемом уровня р. Солзан, а также оползни и камнепады [9]. На метеостанции Хамар-Дабан суммарно

за двое суток выпало 349 мм, а в г. Байкальск – 274 мм за 48 ч. Активная фронтальная зона 21 июля 2019 г. и центр окклюдирующего циклона 22–23 июля 2019 г. с затяжными сильными дождями привели к паводку в Амурской области [7].

Оценка прогнозов проводилась за даты, предшествовавшие вышеуказанным паводкам. Из 15 станций, участвующих в анализе для Забайкальского края, дожди с интенсивностью более 10 мм/24ч в первый день оценки выпали на 7 станциях, во второй – на 13. В случае Амурской области из 8 анализируемых станций в первый день сильные дожди прошли на 6, во второй – на 4 метеостанциях. Для района р. Уда и р. Ия (г. Тулун) из 15 станций интенсивные осадки наблюдались на 12, для второго региона Иркутской области – из 14 станций в первый день осадки выпали на 10 из них, а на следующие сутки – на 11. Таким образом, для всех рассматриваемых территорий количество метеостанций с дождями интенсивностью более 10 мм/24ч составляло половину и более, что в совокупности с анализом синоптической ситуации и характером выпадения дождей позволяет отнести данные случаи к крупномасштабным осадкам с сильными ливнями.

В случае быстроразвивающихся гидрологических процессов большое значение приобретает количество сильных осадков, выпавшее на большой территории [4, 6]. Учитывая крупномасштабность синоптических процессов и отсутствие дополнительной детализации (downscaling) прогностических полей, были проведены два типа анализа: рассчитаны количественные оценки осредненных по пространству сумм осадков всех градаций для каждого вышеописанного случая (рис. 2) по данным наземных метеорологических станций, попавших в каждый из регионов и координаты которых указаны в первом разделе статьи, и получены оценки факта выпадения дождей градации 10–50 мм/24ч по тем же данным наблюдений (табл. 2).

Оценка успешности проводилась для прогнозов модели ПЛАВ20 с заблаговременностью до 5 сут. Вследствие того, что с точки зрения гидрологии нет универсальной пороговой величины выпавшей влаги, после которой ситуацию можно считать предпаводковой, для упрощения анализа в качестве критического значения среднего количества осадков по региону была выбрана величина умеренно сильных дождей 20 мм/24ч [27]. В трех из четырех случаев такие осадки шли двое суток подряд (рис. 2). В данном случае для расчета среднего использовались осадки всех градаций, выпавшие на метеостанциях, попавших в рассматриваемую область. При этом показателем успешности прогноза считалось не точное совпадение осредненных по пространству сумм осадков, а факт преодоления порога умеренно сильных дождей. Такой подход может быть оправдан в случае среднесрочного прогноза. Ожидание крупномасштабных сильных дождей на обширной территории при такой заблаговременности должно привлечь особое внимание специалистов-прогнозистов и лиц, принимающих решения, чтобы с одной стороны,

продолжать отслеживать ситуацию с помощью краткосрочных и сверхкраткосрочных прогнозов, а с другой стороны, быть готовыми к развитию опасных явлений [31]. Такой подход соответствует концепции внедряемого ВМО бесшовного прогноза.

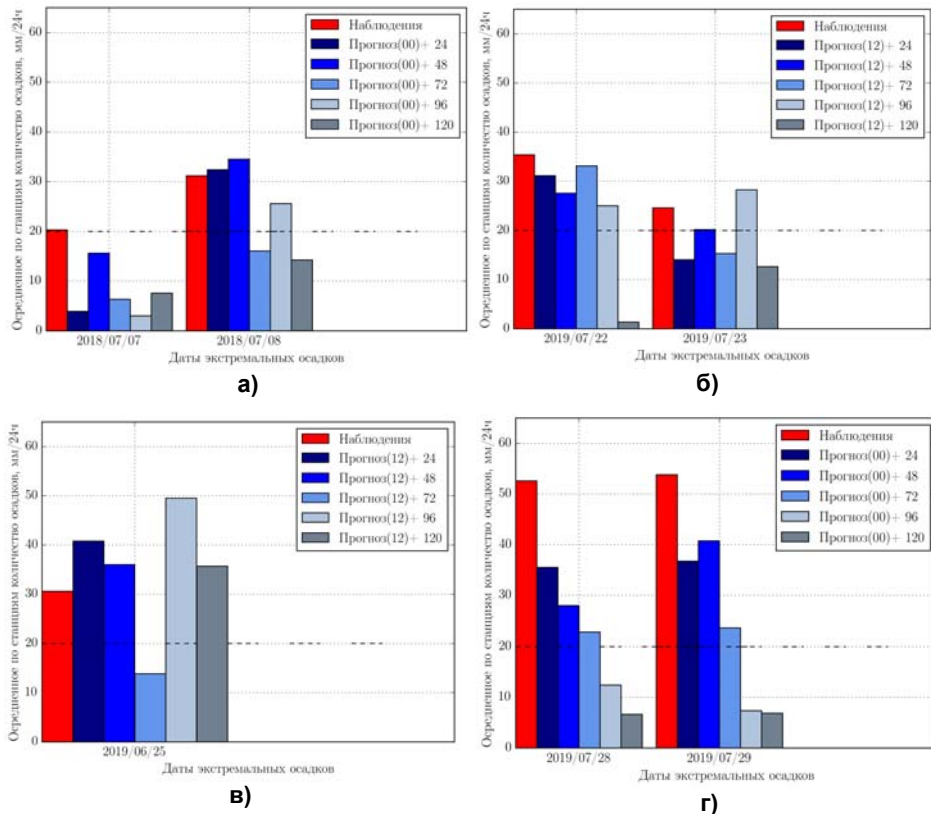


Рис. 2. Суточные суммы осадков, осредненные по региону: наблюдения (красный) и прогнозы на данный день с заблаговременностью до 5 сут: Забайкальский край, район р. Шилка (а); Амурская область, район р. Селемджа (б); Иркутская область, район. р. Ия и р. Уда (в); Иркутская область, район р.Солзан (г). Штриховая линия – пороговое значение суточной суммы осадков (20 мм/24ч). Различные цвета соответствуют различным заблаговременностям прогноза.

Fig. 2. Daily accumulated precipitation amount averaged over the region: observations (red) and forecasts with the lead times of up to 5 days valid for the given day: Zabaikalskiy kray, area of Shilka river (a); Amur region, area of river Selemdzha (б); Irkutsk region, area of rivers Iya and Uda (в); Irkutsk region, area of Solzan river (г). Dashed line designates the threshold of daily accumulated precipitation (20 mm/24 hours). Different colors represent different forecast lead-time.

За исключением первого рассматриваемого дня для Забайкальского края и второго для Амурской области, прогноз осадков по всем регионам можно считать успешным на первые-вторые сутки, четвертые – для большинства рассматриваемых регионов, кроме области р. Солзан, и даже пятые для Иркутской области, районов р. Ия и р. Уда (рис. 2). Прогноз с заблаговременностью 72 ч можно считать хорошим только для Амурской области (первые сутки, рис. 2б) и Иркутской области, район р. Солзан (рис. 2г). Полученные результаты хорошо согласуются с постанционной оценкой суточных осадков для рассмотренных случаев (табл. 2).

Показатели прогноза сильных осадков градации 10–50 мм/24ч получились довольно высокие. Доля правильно спрогнозированных явлений в местах их наблюдения H_g убывает с увеличением заблаговременности прогноза: в первые трое суток она составляет 0,46–0,86, а в четвертые-пятые 0,14–0,71. Ложные тревоги в прогнозе осадков превышают 50 % в двух районах только для заблаговременностей от 3–5 сут.

По совокупности критериев можно сказать, что для Забайкальского края прогноз сильных осадков с интенсивностью 10–50 мм/24ч успешен, так как при невысоком проценте ложных тревог показан хороший результат прогноза осадков. Однако на пятые сутки прогноза количество пропущенных целей превышает количество попаданий. Для Амурской области показана хорошая предупрежденность явления, но величина ложных тревог в прогнозе отсутствия осадков сильно колеблется в зависимости от времени суток прогноза. В случае Иркутской области, района р. Ия и р. Уда, количество спрогнозированных – подтвердившихся и пропущенных событий примерно одинаково. $Bias$ около 0,5 и менее говорит о недооценке прогностического количества явлений по сравнению с наблюдаемыми примерно в 2 раза. При этом почти не отмечалось ложных тревог. Для второго региона Иркутской области показатель H_g очень высокий, так же как и F_r , что вместе со средней ошибкой ($Bias$) больше 1 указывает на переоценку количества осадков по данным модели.

В случае Иркутской области района р. Ия и р. Уда TS для прогноза с заблаговременностью 72 ч составил 0,5, а для 96 ч – 0,182, т. е. факт выпадения сильных осадков (табл. 2) существенно лучше спрогнозирован в первом случае. На рис. 2в видно, что осредненное количество модельных осадков на рассматриваемой территории для этих сроков примерно одинаково отличается от наблюдаемого (-16,75 мм/24ч и +18,9 мм/24ч соответственно), но в разном направлении. Значит, при прогнозе на 72 ч модель спрогнозировала лучше местоположение очага дождей градации 10–50 мм/24ч, но суммарно недооценила осадки, а при прогнозе на 96 ч, наоборот, переоценила в сторону очень сильных дождей (> 50 мм/24ч) (рис. 1в, г).

Таблица 2. Оценка качества прогноза сильных осадков по данным глобальной модели атмосферы ПЛАВ20 в дни, предшествовавшие сильным паводкам

Table 2. Verification of heavy precipitation forecast by the global atmosphere model SL-AV20 for the periods preceding to strong floods

Название региона (время старта прогнозов) N	Заблаговременность прогноза, ч	G / N _G	PC	FAR	Ur	Hr	Bias	Fr	TS
Забайкальский край, район р. Шилка (00 ВСВ) 27	24	10.1-50.0	0.815	0	0.263	0.737	0.737	0	0.737
	48		0.704	0.133	0.316	0.684	0.790	0.25	0.619
	72		0.630	0.091	0.474	0.526	0.579	0.125	0.5
	96		0.704	0	0.421	0.579	0.579	0	0.579
	120		0.556	0.182	0.526	0.478	0.579	0.25	0.429
Амурская область, район р. Селемджа (12 ВСВ) 13	24	10.1-50.0	0.769	0.25	0.143	0.857	1.143	0.333	0.667
	48		0.615	0.417	0	1	1.714	0.833	0.583
	72		0.692	0.286	0.286	0.714	1	0.333	0.556
	96		0.462	0.5	0.286	0.714	1.429	0.833	0.417
	120		0.308	0.75	0.857	0.143	0.571	0.5	0.1
Иркутская область, район рек Ия и Уда (12 ВСВ) 15	24	10.1-50.0	0.667	0	0.455	0.546	0.546	0	0.546
	48		0.6	0	0.546	0.455	0.455	0	0.455
	72		0.6	0.143	0.455	0.546	0.636	0.25	0.5
	96		0.4	0	0.818	0.182	0.182	0	0.182
	120		0.533	0	0.636	0.364	0.364	0	0.364
Иркутская область, район р.Солзан (00 ВСВ) 26	24	10.1-50.0	0.615	0.421	0.154	0.846	1.462	0.615	0.524
	48		0.615	0.412	0.231	0.769	1.308	0.539	0.5
	72		0.5	0.5	0.154	0.846	1.692	0.846	0.458
	96		0.385	0.615	0.615	0.385	1	0.615	0.238
	120		0.539	0.444	0.615	0.385	0.692	0.308	0.294

Примечание. N – общее количество случаев всех интенсивностей; G – градации интенсивностей осадков, мм/24ч; N_G – количество случаев рассматриваемой градации.

На взгляд авторов, при примерно равном значении по модулю средних количественных ошибок, вывод об успешности или неуспешности таких прогнозов сильно зависит от общей синоптической ситуации. Если по данным дополнительных источников существует угроза паводка, то среднесрочный прогноз с переоценкой количества

осадков можно считать успешнее, так как в этом случае он позволит заранее обратить внимание на потенциальное опасное явление. Если же такой угрозы нет, то прогноз с недооценкой осадков можно считать лучше, так как в нем пространственное представление очага сильных дождей ближе к наблюдаемому.

Прогноз очень сильных осадков с интенсивностью более 50 мм/24ч не представлен в табл. 2, так как для всех регионов, кроме Иркутской области, района р. Солзан, количество явлений не превышало 3 случаев.

Анализ пространственного соотношения прогностических полей и сумм осадков за 24 ч по данным наблюдений представлен на рис. 3.

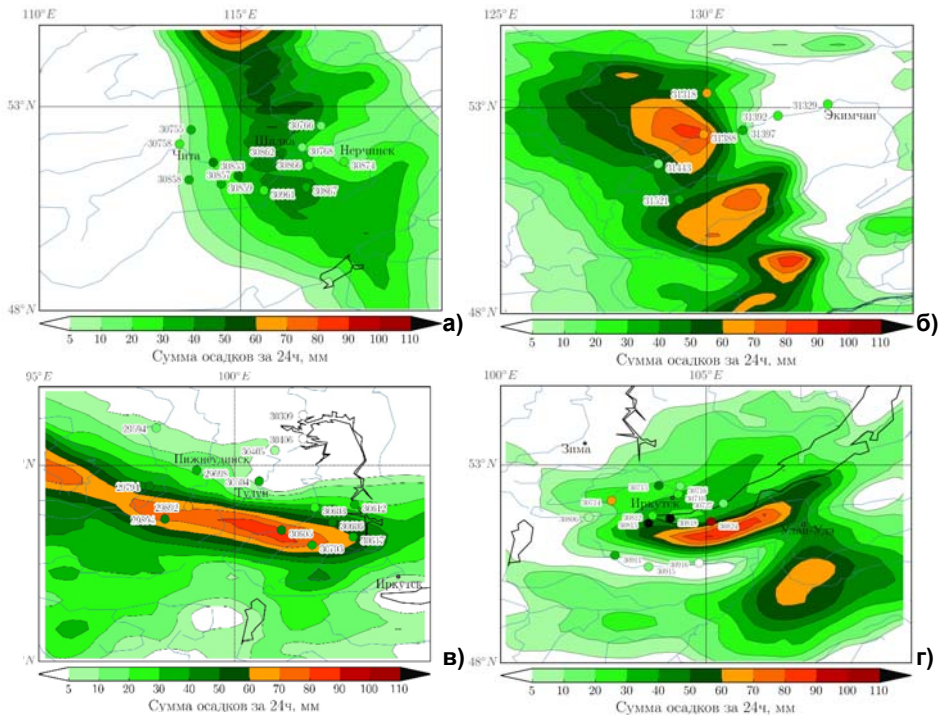


Рис. 3. Прогноз ПЛАВ20 и данные наблюдений на станциях (кружки) для суточных сумм осадков: Забайкальский край, район р. Шилка, прогноз от 04.07.2018 00 ч ВСВ+96 ч (а); Амурская область, район р. Селемджа, прогноз от 18.07.2019 12 ч ВСВ+96 ч (б); Иркутская область, район. р. Ия и р. Уда, прогноз от 20.06.2019 12 ч ВСВ+120 ч (в); Иркутская область, район р. Солзан, прогноз от 26.07.2019 00 ч ВСВ+72 ч (г). Представлены только те метеостанции, которые передавали данные об осадках в указанные сутки.

Fig. 3. Daily accumulated precipitation for SL-AV20 forecast and station observation data (circles): Zabaykalskiy kray, area of river Shilka, 96-hours forecast from 00UTC 04.07.2018 (a); Amur region, area of river Selemdzha, 96-hours forecast from 12UTC 18.07.2019 (б); Irkutsk region, area of rivers Iya and Uda, 120-hour forecast from 12UTC 20.06.2019 (в); Irkutsk region, area of river Solzan, 72-hour forecast from 00UTC 26.07.2019 (г). Only the meteorostations that have transmitted precipitation data at the given day are shown.

Для Забайкальского края прогностическое поле осадков сдвинуто относительно станций наблюдений на восток, хотя его общая структура распределения (минимальные и максимальные значения) сохранена (рис. 3а). Для Амурской области отмечается хорошее согласование прогностических и фактических максимумов сумм выпавших осадков (рис. 3б). Отметим, что в обоих случаях полезная заблаговременность прогноза составила четверо суток (96 ч). Для двух регионов Иркутской области (рис. 3в, г) отмечается несовпадение локальных максимумов осадков по данным модели и наблюдений. Для района р. Ия и р. Уда прогностический центр осадков смещен на восток по сравнению с данными станций, а для района р. Солзан – на юго-восток. Особенно это заметно для пунктов с суточной суммой более 120 мм (рис. 3г). В последнем случае отсутствие наземных измерений в прогностическом центре осадков затрудняет полноценный анализ точности воспроизведения моделью пространственного распределения рассматриваемого явления. В трех из четырех случаях пространственные максимумы прогностических осадков сдвинуты на восток относительно наблюдений. При этом на рассматриваемых территориях находятся горные хребты, расположенные таким образом, что прогностические осадки находятся уже за ними, а по данным наблюдений – над или перед ними. Таким образом, можно предположить, что сглаженная орография, используемая в модели, может способствовать ускоренному прохождению зон осадков в гористой местности по сравнению с фактическим распределением.

Заключение

Выполнены предварительные оценки прогноза сильных осадков, выпадающих одновременно на территории с масштабом порядка сотни километров, по глобальной модели атмосферы ПЛАВ20. Эти оценки показывают, что прогноз таких сильных осадков с заблаговременностью до 3 суток, в отдельных случаях до 5 суток, можно считать успешным. При этом качество прогноза дождей интенсивностью 10–50 мм/24ч выше, чем интенсивностью более 50 мм/24ч. Достоверная оценка последних затруднена в связи с редкостью данного явления. Также можно сказать, что по оценкам за 2 месяца модель ПЛАВ20 скорее недооценивает сильные осадки и имеет проблемы с пространственной локализацией очагов. Это может быть связано с тем, что модели сложно разрешить сильные конвективные осадки в силу довольно большого шага сетки. Дополнительный анализ сильных дождей, связанных с крупными синоптическими объектами, показал, что модель может воспроизводить экстремальные осадки до 3 суток, а в отдельных случаях до 4–5 суток. Это может быть очень полезно для прогноза опасных метеорологических и гидрологических явлений. Дальнейшие работы по повышению разрешения модели, анализ осадков на большем материале наблюдений, а также разделение при оценке на типы синоптической ситуации помогут объективнее оценить результаты численного прогноза сильных осадков модели ПЛАВ20.

Список литературы

1. *Абдулаев М.* Наводнение в Иркутской области: глобальное потепление и низкие дамы. https://chrdrk.ru/other/navodnenie_v_irkutskoi_oblasti_globalnoe_poteplenie (Дата доступа 15.08.2019 г.).
2. *Агафонникова Е.О., Дьяконова Т.А., Хоперсков А.В., Храпов С.С.* Прогноз динамики затопления территорий Крымского района в период ливневого паводка 2012 г. на основе компьютерного моделирования // *Материалы Международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС»*. 2016. № 1 (20). С. 280-288.
3. *Булаво В., Шильникова О.* Как воду проглядели. <https://www.chita.ru/articles/118423/> (Дата доступа 15.08.2019 г.).
4. *Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.* Математическое моделирование в гидрологии. М.: Академия, 2010. 297 с.
5. *Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И.* Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. М.: ООО «ДЭКС-Пресс», 2003. 352 с.
6. *Гончарук И.В., Бесчастная Т.Н., Березнева Т.Ю.* Методы краткосрочного прогноза максимальных уровней и расходов воды на реках Приморского края в летне-осенний период. // *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. 2007. Информационный сборник № 35. С. 125-145.
7. *Зорина М.* Власти Амурской области оценили потери от наводнения в 3,5 млрд рублей. <https://www.kommersant.ru/doc/4052768>. (Дата доступа 15.08.2019 г.).
8. Код для оперативной передачи данных приземных метеорологических наблюдений с сети станций Росгидромета. КН-01 SYNOP. М.: Росгидромет, 2012. 78 с. <http://method.meteorf.ru/norma/rec/code.pdf>
9. *Литчинская О.* Наводнение в Иркутской области: «В магазинах уже трудно найти яйца, хлеб – люди начинают все скупать». <https://www.irk.kp.ru/daily/27008.5/4070655/> (Дата доступа 15.08.2019 г.).
10. *Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Нестерова Н.В., Виноградов А.Ю., Бельдидан И.Н., Колупаева А.Д.* Моделирование катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе // *Геориск*. 2018. Том 12, № 3. С. 34-45.
11. Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования. Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО // ВМО-№ 485. 2017. 161 с. https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/WMO/485_ru.pdf
12. РД 52.27.284-91. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Москва. 150 с. http://method.meteorf.ru/norma/document/rd_1991.pdf
13. *Тищенко В.А., Хан В.М., Толстых М.А., Круглова Е.Н., Куликова И.А., Гельфан А.Н.* Применение статистической коррекции месячных и сезонных детерминистских прогнозов температуры воздуха и осадков по модели ПЛАВ для отдельных районов России // *Труды Гидрометцентра России*. 2015. Вып. 358. С. 121-133.
14. *Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Красюк Т.В., Кострыкин С.В., Мизяк В.Г., Фадеев Р.Ю., Шайкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю.* Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 6. С. 25-35.
15. *Толстых М.А., Шайкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорьлова С.В., Юрова А.Ю.* Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза М.: Трида лтд, 2017. 166 с.
16. *Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шайкин В.В., Гойман Г.С., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., Махнорьлова С.В., Мизяк В.С., Рогутов В.С.* Многомасштабная глобальная модель атмосферы ПЛАВ: результаты среднесрочных прогнозов погоды // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 11. С. 90-99.
17. *Фадеев Р.Ю., Толстых М.А., Володин Е.М.* Климатическая версия модели атмосферы ПЛАВ: разработка и первые результаты // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 1. С. 22-35.

18. Шашкин В.В., Толстых М.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Версия модели атмосферы ПЛАВ в гибридной системе координат по вертикали // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 9. С. 24-35.
19. Шашкин В.В., Толстых М.А., Володин Е.М. Моделирование циркуляции стратосферы полулагранжевой моделью атмосферы ПЛАВ // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 1. С 5-21.
20. Bougeault P. A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection // *Mon. Wea. Rev.* 1985. Vol. 113. P. 2108-2212.
21. Chou M.-D., Suarez M. J. A solar radiation parameterization for atmospheric studies // *NASA/TM-1999-104606*. Vol. 15. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 48 p.
22. Ebert B. Methods for verifying spatial forecasts, 2009. <https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u30/Spatial%20Forecast%20Verification.pdf>
23. Gerard L., Geleyn J.-F. Evolution of a subgrid deep convection parametrization in a limited-area model with increasing resolution // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 2005. Vol. 131. P. 2293-2312.
24. Guan H., Zhu Y. Development of verification methodology for extreme weather forecasts // *Weather and forecasting*. 2016. Vol. 32, no. 2. P. 479-491.
25. Gerard L., Piriou J.-M., Brožková R., Geleyn J.-F., Banciu D. Cloud and Precipitation Parameterization in a Meso-Gamma-Scale Operational Weather Prediction Model // *Mon. Weather Rev.* 2009. Vol. 137. P. 3960-3977.
26. Haiden T., Rodwell M.J., Richardson D.S., Okagaki A., Robinson T. and Hewson T. Intercomparison of global model precipitation forecast skill in 2010/11 using the SEEPS score // *ECMWF Technical Memorandum*. 2012. 23 p.
27. Haiden T., Duffy S. Use of high-density observations in precipitation verification // *ECMWF Newsletter No. 147*. 2016. P. 20-25.
28. Marzban C., Sandgathe S. Cluster analysis for verification of precipitation fields // *Weather and forecasting*. 2006. Vol. 21. P. 824-838.
29. Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A. RRTM, a validated correlated-k model for the longwave // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102, no. 16. P. 16.663-16.682.
30. Neumann P., Düben P., Adamidis P., Bauer P., Brück M., Kornblüeh L., Klocke D., Stevens B., Wedi N., Biercamp J. Assessing the scales in numerical weather and climate predictions: will exascale be the rescue? // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2019. Vol. 377. P. 20180148.
31. Slingo J. Toward seamless climate-weather and environmental prediction // *The World Weather Open Science conference, Plenary report*, 2014. https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/wwosc/documents/WWOSC_Plenary_Aug_2014_Slingo.pdf
32. Tarasova T., Fomin B. The Use of New Parameterizations for Gaseous Absorption in the CLIRAD-SW Solar Radiation Code for Models // *J. Atmos. Oceanic. Technol.* 2007. Vol. 24, no. 6. P. 1157-1162.
33. Termonia P., Fischer C., Bazile E., Bouyssel F., Brozková R., Bénard P., Bochenek B., Degrauwe D., Derková M., Khatib R. E., Hamdi R., Mašek J., Pottier P., Pristov N., Seity, Y., Smoliková P., Španiel O., Tudor M., Wang Y., Wittmann C., Joly A. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1 // *Geosci. Mod. Dev.* 2018. Vol. 11. P. 257-281.
34. Tolstykh M., Shashkin V., Fadeev R., Goyman G. Vorticity-divergence semi-Lagrangian global atmospheric model SL-AV20: dynamical core // *Geosci. Model Dev.* Vol. 10. P. 1961-1983.
35. Wilks D. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* // Elsevier. 2011. Vol. 100. P. 704.

References

1. Abdulaev M. Navodnenie v Irkutskoy oblasti: global'noe poteplenie i nizkie damby. Available at: https://chrdr.ru/other/navodnenie_v_irkutskoi_oblasti_globalnoe_poteplenie [in Russ.].

2. Agafonnikova E.O., Dyakonova T.A., Khoperskov A.V., Khrapov S.S. Forecast of the dynamics flooding of the Crimean area during of flash floods in 2012 on the basis computer simulation. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii "Interkarto. Intergis" [Proceedings of the International conference "InterCarto. InterGIS"]*, 2016, vol. 20, no. 1, pp. 280-288. DOI: 10.24057/2414-9179-2014-1-20-280-288 [in Russ.].
3. Bulavko V., Shil'nikova O. Kak vodu proglyadeli. Available at: <https://www.chita.ru/articles/118423/> [in Russ.].
4. Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. *Matematicheskoe modelirovanie v gidrologii*. Moscow, Academia, 2010, 297 p. [in Russ.].
5. Vorob'ev Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. *Katastroficheskie navodneniya nachala XXI veka: uroki i vyvody*. Moscow, OOO "DEKS-Press", 2003, 352 p. [in Russ.].
6. Goncharuk I.V., Beschastnaya T.N., Berezneva T.Yu. *Metody kratkosrochnogo prognoza maksimal'nyh urovney i raskhodov vody na rekah Primorskogo kraya v letne-osenniy period. Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*. Informatsionnyy sbornik No. 35, 2007, pp. 125-145 [in Russ.].
7. Zorina M. *Vlasti Amurskoy oblasti ocenili poteri ot navodneniya v 3,5 mlrd rubley*. Available at: www.kommersant.ru/doc/4052768 [in Russ.].
8. *Kod dlya operativnoy peredachi dannyh prizemnykh meteorologicheskikh nablyudenyi s seti stantsiy Rosgidrometa. KN-01 SYNOP*. Moscow, Roshydromet, 2012, 78 p. Available at: <http://method.meteorf.ru/norma/rec/code.pdf> [in Russ.].
9. Lipchinskaya O. *Navodnenie v Irkutskoy oblasti: «V magazinah uzhe trudno nayti yayca, hleb – lyudi nachinayut vse skupat»*. Available at: www.irk.kp.ru/daily/27008.5/4070655/ [in Russ.].
10. Makar'eva O.M., Vinogradova T.A., Nesterova N.V., Vinogradov A.YU., Bel'diman I.N., Kolupaeva A.D. *Modeling of catastrophic floods in the Tuapse River basin*. *Georisk*, 2018, vol. 12, no. 3, pp. 34-45 [in Russ.].
11. *WMO Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. Volume I (Annex IV to WMO Technical Regulations)*. WMO-No. 485, Updated in 2017, 161 p.
12. RD 52.27.284-91. *Metodicheskie ukazaniya. Provedenie proizvodstvennykh (operativnykh) ispytaniy novyh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofizicheskikh prognozov*. 150 p. Available at: http://method.meteorf.ru/norma/document/rd_1991.pdf [in Russ.].
13. Tishchenko V.A., Khan V.M., Tolstykh M.A., Kruglova E.N., Kulikova I.A., Gelfan A.N. *Application of statistical correction for deterministic monthly and seasonal PLAV model forecasts of air temperature and precipitation for some regions of Russia*. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 358, pp. 121-133 [in Russ.].
14. Tolstykh M.A., Geleyn J.-F., Volodin E.M., Bogoslovskii N.N., Vilfand R.M., Kiktev D.B., Krasjuk T.V., Kostrykin S.V., Mizyak V.G., Fadeev R.Yu., Shashkin V.V., Shlyayeva A.V., Ezau I.N., Yurova A.Yu. *Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model*. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 6, pp. 374-382. DOI: 10.3103/S1068373915060035.
15. Tolstykh M.A., Shashkin V.V., Fadeev R.Yu., Shlyayeva A.V., Mizyak V.G., Rogutor V.S., Bogoslovskii N.N., Goyman G.S., Mahnorylova S.V., Yurova A.Yu. *Sistema modelirovaniya atmosfery dlya besshovnogo prognoza [Atmosphere modelling system for seamless prediction]*. Moscow, Triada LTD publ., 2017, 166 p. [in Russ.].
16. Tolstykh M.A., Fadeev R.Yu., Shashkin V. V., Goyman G.S., Zaripov R.B., Kiktev D.B., Makhnorylova S.V., Mizyak V.G., Rogutor V.S. *Multiscale Global Atmosphere Model SL-AV: the Results of Medium-range Weather Forecasts*. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 11, pp. 773-779. DOI: 10.3103/S1068373918110080.
17. Fadeev R.Yu., Tolstykh M.A., Volodin E.M. *Climate Version of the SL-AV Global Atmospheric Model: Development and Preliminary Results*. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 1, pp. 13-22. DOI: 10.3103/S1068373919010023.
18. Shashkin V.V., Tolstykh M.A., Ivanova A. R., Skriptunova E.N. *SL-AV atmospheric model version using σ -p hybrid vertical coordinates*. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 9, pp 554-563. DOI: 10.3103/S1068373917090023.

19. *Shashkin V.V., Tolstykh M.A., Volodin, E.M.* Stratospheric Circulation Modeling with the SL-AV Semi-Lagrangian Atmospheric Model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 1, pp. 1-12. DOI: 10.3103/S1068373919010011.
20. *Bougeault P.* A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection. *Mon. Wea. Rev.*, 1985, vol. 113, pp. 2108-2212.
21. *Chou M.-D., Suarez M. J.* A solar radiation parameterization for atmospheric studies. NASA/TM-1999-104606, Vol. 15, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 48 p.
22. *Ebert B.* Methods for verifying spatial forecasts, 2009. Available at: <https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u30/Spatial%20Forecast%20Verification.pdf>
23. *Gerard L., Geleyn J.-F.* Evolution of a subgrid deep convection parametrization in a limited-area model with increasing resolution. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 2005, vol. 131, pp. 2293-2312.
24. *Guan H., Zhu Y.* Development of verification methodology for extreme weather forecasts. *Weather and forecasting*, 2016, vol. 32, no. 2, pp. 479-491.
25. *Gerard L., Piriou J.-M., Brožková R., Geleyn J.-F., Banciu D.* Cloud and Precipitation Parameterization in a Meso-Gamma-Scale Operational Weather Prediction Model. *Mon. Weather Rev.*, 2009, vol. 137, pp. 3960-3977.
26. *Haiden T., Rodwell M.J., Richarson D.S., Okagaki A., Robinson T., Hewson T.* Intercomparison of global model precipitation forecast skill in 2010/11 using the SEEPS score. ECMWF Technical Memorandum, 2012, 23 p.
27. *Haiden T., Duffy S.* Use of high-density observations in precipitation verification. ECMWF Newsletter, no. 147, 2016, pp. 20-25.
28. *Marzban C., Sandgathe S.* Cluster analysis for verification of precipitation fields. *Weather and forecasting*, 2006, vol. 21, pp. 824-838.
29. *Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., Clough S.A.* RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 1997, Vol. 102, no. 16, pp. 16.663-16.682.
30. *Neumann P., Düben P., Adamidis P., Bauer P., Brück M., Kornblüeh L., Klocke D., Stevens B., Wedi N., Biercamp J.* Assessing the scales in numerical weather and climate predictions: will exascale be the rescue? *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 2019, vol. 377, pp. 20180148.
31. *Slingo J.* Toward seamless climate-weather and environmental prediction // The World Weather Open Science conference, Plenary report, 2014. Available at: www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/wwosc/documents/WWOSC_Plenary_Aug_2014_Slingo.pdf.
32. *Tarasova T., Fomin B.* The Use of New Parameterizations for Gaseous Absorption in the CLIRAD-SW Solar Radiation Code for Models. *J. Atmos. and Oceanic Technology*, 2007, vol. 24, no. 6, pp. 1157-1162.
33. *Termonia P., Fischer C., Bazile E., Bouyssel F., Brozková R., Bénard P., Bochenek B., Degrauwe D., Derková M., Khatib R. E., Hamdi R., Mašek J., Pottier P., Pristov N., Seity, Y., Smoliková P., Španiel O., Tudor M., Wang Y., Wittmann C., Joly A.* The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geosci. Mod. Devel.*, 2018, vol. 11, pp. 257-281.
34. *Tolstykh M., Shashkin V., Fadeev R., Goyman G.* Vorticity-divergence semi-Lagrangian global atmospheric model SL-AV20: dynamical core. *Geosci. Model Dev.*, vol. 10, pp. 1961-1983.
35. *Wilks D.* Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. *Elsevier*, 2011, vol. 100, pp. 704.

Поступила в редакцию 03.02.2020 г.

Received by the editor 03.02.2020.