

УДК 551.5:001.891.57

Прогноз погоды для авиации на основе продукции численных моделей атмосферы

Н.П. Шакина

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

Авиация – основной и наиболее требовательный потребитель метеорологической информации – нуждается в краткосрочном и сверхкраткосрочном прогнозе явлений погоды и метеорологических величин, многие из которых в настоящее время не предвычисляются в современных численных моделях. Сюда относятся: скорость ветра в струйных течениях, высота уровня максимального ветра, высота тропопаузы, зоны турбулентности в ясном небе и зоны возможного обледенения самолетов, характеристики атмосферной конвекции, высота нулевой изотермы, высота нижней границы облаков и многое другое. Методы прогноза таких явлений и величин в течение последних 40 лет разрабатываются в Отделе авиационной метеорологии путем постпроцессинга выходной продукции глобальных и региональных численных моделей, оперативно используемых в Гидрометцентре России. Для таких разработок необходимо, с одной стороны, глубокое понимание физики изучаемых явлений, умение применять к практическим задачам достижения динамической метеорологии; с другой – наличие баз данных специальных наблюдений (в частности, аэродромных наблюдений в коде METAR) и модельных прогностических полей. Создание и пополнение таких баз – одно из важных направлений работы отдела. Важнейшим участком работы отдела является оперативное прогнозирование условий полета на верхних и средних уровнях атмосферы, осуществляемое лабораторией зональных прогнозов отдела авиационной метеорологии. Синоптики лаборатории выпускают ежедневно 24 прогностических карты, передаваемые авиационным потребителям по каналам связи. Прогнозы условий полетов на нижних уровнях размещаются в интернете на специальном портале ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» (низкая и конвективная облачность и ее границы, турбулентность, зоны обледенения, нулевая изотерма как результат постпроцессинга продукции модели COSMO-Ru7).

Ключевые слова: постпроцессинг, численный прогноз, струйные течения, тропопауза, турбулентность, обледенение, конвекция, низкая облачность, базы данных, аэродромные наблюдения, особые явления для авиации, прогноз условий полета на верхних, средних и нижних уровнях

Aviation weather forecasting based on numerical weather prediction products

N.P. Shakina

Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

Aviation being the main and the most demanding consumer of meteorological information constantly needs short- and very short-range forecasts as well as nowcasts of weather phenomena and meteorological parameters many of which are currently not

predicted directly in the numerical weather prediction models. These parameters include the jet stream wind speed and axis height, tropopause height, clear-air turbulence and possible icing zones, atmospheric convection parameters, zero isotherm height, cloud base and top heights, etc. During the last 40 years, the methods to forecast them have been developed in the Aviation Meteorology Department (AMD) by means of postprocessing output data of global and regional numerical models which are in operational use in the Hydrometeorological Centre of Russia. Such studies require, on the one hand, the deep understanding of physical and dynamical nature of processes and the ability to apply the achievements of dynamic meteorology to the practical tasks; on the other hand, the databases of special observations (in particular, the METAR aerodrome observations) and model output data are needed. So, the important tasks of AMD are the data collection and the database development. The major area of the AMD work is the operational forecasting of significant weather at the high and medium atmospheric levels which is carried out by the Laboratory for Zonal Forecasting. It daily issues 24 forecast charts transmitted to the aviation consumers. The forecasts of significant weather at low levels (low and convective clouds and its boundaries, turbulence, icing zones, and zero isotherm height as a result of the COSMO-Ru7 model product postprocessing) are published on the special Aviamettelecom of Roshydromet portal.

Keywords: post-processing, numerical weather prediction, jet streams, tropopause, turbulence, icing, convection, low clouds, databases, aerodrome observations, significant weather (SW), SW forecasting at high, medium and low levels

Авиация – основной и наиболее требовательный потребитель метеорологической информации – постоянно нуждается в краткосрочном и сверхкраткосрочном прогнозе и наукастинге атмосферных явлений и физических величин, влияющих на взлет, посадку и полет воздушных судов. В современных условиях основную прогностическую информацию об атмосферных процессах дают численные модели атмосферы. Однако до настоящего времени продукция даже наиболее продвинутых численных моделей не включает многих величин, прогноз которых необходим для авиации. Их прогноз на практике дается авиационными синоптиками с помощью имеющихся расчетных и синоптических методов и с опорой на собственный опыт. Магистральный путь получения прогностических данных о таких величинах состоит в их расчете на основе тех величин, которые в численных моделях прогнозируются. Это так называемый постпроцессинг выходной продукции численных моделей на основе известных физических закономерностей и эмпирических данных. Метод постпроцессинга широко применяется в авиационной метеорологии начиная с 60-х годов прошлого века. В нашей стране пионерской работой в этом направлении следует считать [1].

Особенность авиационной метеорологии и авиационного прогнозирования состоит в том, что они охватывают весьма широкий спектр атмосферных процессов, включающий как крупномасштабные (струйные течения, топография тропопаузы), так и мезомасштабные (атмосферные фронты, конвективные системы) и микромасштабные (линии шквалов, турбулентные зоны) объекты. Чтобы успешно работать в области авиационной метеорологии, специалист должен обладать широким кругозором в динамике атмосферы, быть на уровне ее актуальных задач.

В отделе авиационной метеорологии (ОАМ) Гидрометцентра России начиная с 70-х годов прошлого века прогресс в разработке методов прогноза для авиации основан на применении достижений динамической метеорологии и посильном их развитии и одновременно на использовании такого мощного метода исследования, как расчеты по реальным данным с позиций гидродинамики. Такой подход оказался весьма плодотворным и позволил развить, впервые в нашей стране, ряд эффективных прогностических методик. В качестве примера отметим использование концепции потенциального вихря Эртеля для развития метода диагноза и прогноза высоты тропопаузы, а также для исследования стратосферных вторжений и переноса стратосферных радиоактивных примесей. Указанная концепция лежит в основе работ [5–9], содержащих важнейшие результаты докторской диссертации А.Р. Ивановой.

Другим примером плодотворного использования положений динамической метеорологии являются работы [16, 25, 26], посвященные исследованию векторной фронтогенетической функции и связи ее составляющих. В этих работах важный вклад принадлежит аспирантке отдела Н.И. Комасько (Богаевской). Они явились развитием более ранних работ отдела по объективному выделению зон атмосферных фронтов и исследованию вкладов конвективного и бароклинного механизмов в генерацию осадков [17, 18, 30]. В [16, 25, 26] анализируются количественные характеристики фронтогенеза – процесса изменения во времени вектора горизонтального градиента температуры в индивидуальной воздушной частице. Фронтогенез, представляющий собой механизм восстановления баланса термического ветра при неоднородной адвекции, в квазигеострофическом приближении является фактором вынуждения вертикальных движений: дивергенция векторной фронтогенетической функции определяет правую часть диагностического омега-уравнения.

Составляющая векторной фронтогенетической функции в направлении градиента потенциальной температуры есть не что иное, как изменение модуля горизонтального градиента температуры, то есть скалярная фронтогенетическая функция, которая до сих пор и рассматривалась как количественная характеристика фронтогенеза, вошедшая во все учебники синоптической метеорологии. Вторая, вращательная составляющая описывает изменение градиента температуры вследствие поворота изотерм; до сих пор ее влияние на поле скоростей у нас не рассматривалось и попросту игнорировалось. Между тем она, как и первая составляющая, может порождать вертикальные циркуляции – как термически прямые (с восхождением на стороне теплого воздуха), так и термически обратные (с восхождением на стороне холодного воздуха). В [25, 26] по данным объективного анализа с разрешением 1, 25 град. по широте и долготе рассчитаны составляющие фронтогенетической функции для периода 11–15 декабря 2013 г., когда над европейской Россией проходил теплый фронт. Над фронтальной зоной располагалось струйное течение с областью

максимального ветра, во входе которой развилось глубокое стратосферное вторжение на стороне холодного воздуха (рис. 1). Обе составляющие векторной фронтогенетической функции порождали в этом случае термически прямые циркуляции, действующие на разных участках фронтальной зоны. Эти циркуляции способствовали углублению стратосферного вторжения (рис. 2). В то же время восходящие ветви циркуляционных ячеек обуславливали облако- и осадкообразование в зоне атмосферного фронта, причем, ввиду их большого вертикального развития (во всей толще тропосферы), их влияние сказывалось наиболее сильно на формировании мощных облаков и ливневых осадков.

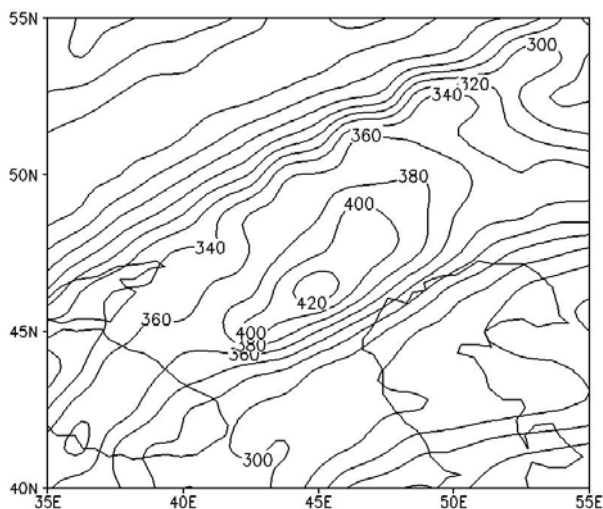


Рис. 1. Высота тропопаузы (давление, гПа) в 00 ч ВСВ 12 декабря 2013 г. [26].

Fig. 1. Tropopause height (pressure, hPa) at 00 UTC, December 12, 2013.

Эффекты фронтогенеза как фактора генерации осадков оценены в [16] на большом материале данных об осадках на станциях и объективного анализа атмосферных полей (2005–2013 гг.). Было показано, что составляющие векторного фронтогенеза играют значительную роль как предиктор осадков, в особенности сильных и очень сильных, во всей области расчета, особенно в северной части и средней полосе европейской России, в Средней Азии и на Северном Кавказе.

Сотрудники ОАМ внесли существенный вклад в исследование условий аномально жаркого лета 2010 года и динамики блокирующего антициклона, обусловившего аномальную жару [15, 23, 24]. Работы в этом направлении тесно связаны с динамикой струйных течений, прогноз которых остается одной из важных практических задач отдела.

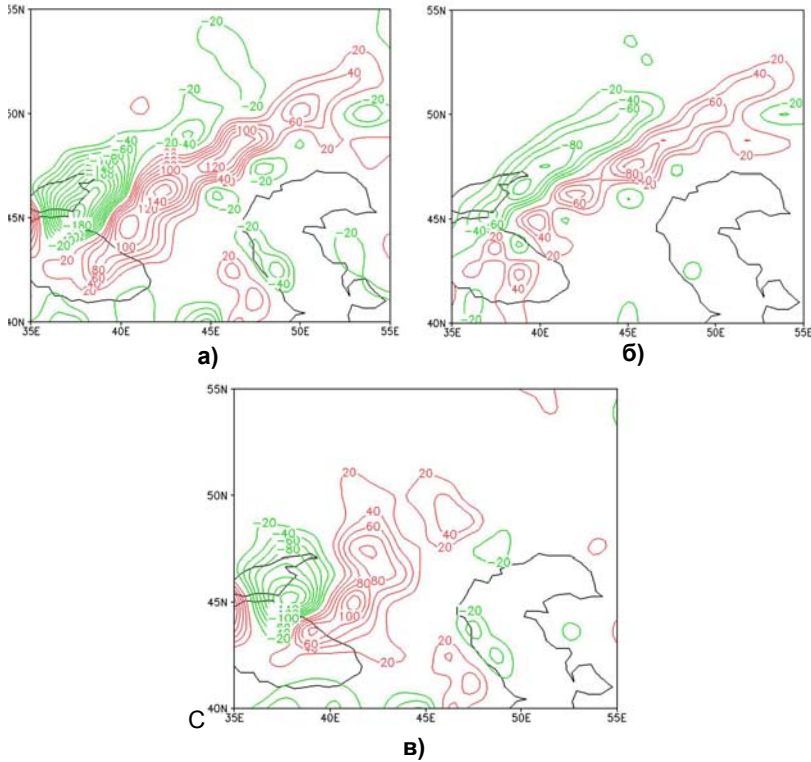


Рис. 2. Изолинии дивергенции векторной фронтогенетической функции (а) и ее составляющих – скалярной (б) и вращательной (в) фронтогенетических функций на поверхности 500 гПа в 12 ч ВСУ 12 декабря 2013 г.; восходящие движения показаны зелеными изолиниями, нисходящие – красными [26].

Fig. 2. Contours of divergence of vector frontogenetic function (a) and of its components – scalar (б) and rotational (в) frontogenetic functions at the 500 hPa level at 12 UTC, December 12, 2013; ascending and descending motions are shown by green and red contours, respectively.

Сотрудники ОАМ внесли существенный вклад в исследование условий аномально жаркого лета 2010 года и динамики блокирующего антициклона, обусловившего аномальную жару [15, 23, 24]. Работы в этом направлении тесно связаны с динамикой струйных течений, прогноз которых остается одной из важных практических задач отдела.

Еще один ряд практических задач ОАМ требует знакомства с динамикой пограничного и приземного слоев, микро- и мезомасштабных процессов в атмосфере. Это потребовалось, в частности, в качестве необходимой основы для развития методов прогноза турбулентности в ясном небе и в пограничном слое [35, 36], а в последнее время – и для разработки метода прогноза орографической турбулентности как результата разрушения гравитационных волн [19].

Можно утверждать, что без использования положений динамики атмосферы невозможно развитие новых методов авиационного прогноза на современном уровне. Другой, не менее важной предпосылкой такого развития является постоянное внимание к накоплению архивов и созданию баз данных. Помимо ранее созданного электронного архива данных самолетного зондирования, в чем особая заслуга принадлежит Р.В. Корнеевой, в отделе созданы и постоянно пополняются базы данных аэродромных наблюдений (по телеграммам в коде METAR). Программа раскодировки телеграмм, фильтрации и исправления наиболее типичных ошибок была составлена А.А. Желниным [38].

С течением времени происходят изменения в информационном потоке данных, в частности, телеграммы с некоторых станций перестают поступать. Выяснение причин таких изменений и поиск недостающей информации в Интернете осуществляют И. А. Горлач, Е.Н. Скриптунова и А.А. Завьялова.

Кроме большой работы по пополнению баз наблюдений на аэродромах европейской и азиатской России и ближнего зарубежья, в отделе ведется архивация продукции оперативных численных прогностических моделей – глобальных и региональных: такие архивы необходимы для разработки новых прогностических методов, а также для постоянно выполняемых работ по мониторингу качества численных прогнозов и успешности рассчитываемых на их основе авиационных прогнозов. Архивировались и данные самолетных измерений (AMDAR и TAMDAR). Во всех этих трудоемких работах задействованы практически все сотрудники группы (до 2018 г. – лаборатории) разработки методов авиационного прогноза; в особенности отметим вклад Р.В. Корнеевой, А.А. Завьяловой, Л.А. Нудельман.

Трудно переоценить возможности исследовательской работы, открывающиеся при наличии хороших баз данных и архивов. Как пример успешного их использования укажем выполненную в отделе разработку метода прогноза зон вероятного обледенения самолетов. В качестве фактических данных были использованы, во-первых, база данных самолетного зондирования, широко проводившегося в СССР в начале 60-х годов прошлого века, и, во-вторых, данные AMDAR, полученные с рейсовых самолетов над территорией США в начале века нынешнего. Эти два массива данных, разнесенных во времени (на полстолетия) и в пространстве (разные полушария и широты), полученные с разных типов самолетов и при разной технике наблюдений, тем не менее позволили, путем тщательного анализа и статистической обработки, получить хорошо согласующиеся между собой, надежные критерии условий обледенения. Этого, естественно, и следовало ожидать, если только данные обоих типов адекватно отражали реальность: микрофизические процессы отложения льда на самолете подчиняются одним и тем же закономерностям независимо от столь различных условий наблюдения. Добавим, что разработанный

метод прогноза зон вероятного обледенения успешно прошел испытания и был принят Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета [33], а впоследствии, по данным опроса, проведенного ФГБУ «Авиаметелеком Росгидромета», заслужил высокую оценку оперативных синоптиков.

Не лишне отметить, что база данных самолетного зондирования создана в отделе на основе сохранившихся (в личном архиве К.Г. Абрамович) первичных материалов – таблиц ТАЭ-10, представляющих собой лишь малую часть тех данных, которые в свое время были опубликованы в специальных ежегодниках и впоследствии – в 70-е годы – повсеместно в системе Гидрометслужбы уничтожены в числе «устаревших» изданий. Так была утрачена ценная, невозполнимая информация, полученная во всех смыслах дорогой ценой.

Что касается архивов данных AMDAR и TAMDAR, то они создавались сотрудниками отдела вручную путем съемки данных с таблиц и карт, размещенных на сайте NOAA в Интернете: работа для энтузиастов!

Расчеты по реальным данным являются одним из наиболее эффективных методов познания закономерностей динамики реальной атмосферы. (Возможности этого метода блестяще продемонстрированы в работах Г.В. Грузы и Э.Я. Раньковой [3].) Сущность метода состоит в том, что по данным наблюдений рассчитываются величины, которые, согласно теоретическим представлениям, количественно характеризуют определенные процессы в атмосфере. Результаты таких расчетов показывают, как в реальных условиях протекает энергообмен и каков вклад тех или иных факторов в данном месте и на данной фазе развития процесса.

Располагая архивами реальных и модельных данных, мы в 2010–2019 гг. продолжали начатые ранее работы по исследованию динамики бароклинических зон, струйных течений и атмосферных фронтов [17, 30]. Отметим работы [40, 41], в которых по результатам анализа кинематики фронтов и условий выпадения замерзающих осадков (в частности, катастрофического гололеда в декабре 2010 г.) показано, что, рассматривая формирование переохлажденных осадков как трехмерный процесс (с учетом адвекции надфронтального теплого воздуха), удастся объяснить часто наблюдаемые случаи выпадения переохлажденных осадков в отсутствие над пунктом теплого слоя внутри облака. (Наличие такого слоя считается обязательным условием для таяния выпадающих из верхней части облака снежинок, так что образующиеся таким образом капли затем переохлаждаются в холодных нижележащих слоях и выпадают, образуя гололед.) Теплый слой воздуха, восходящий над фронтальной поверхностью, переносит и капли, образующиеся в нем; по мере подъема он трансформируется и охлаждается, причем капли осадков, падая в подфронтальный холодный воздух, становятся переохлажденными и выпадают. Таким образом, реализуется тот же «классический» механизм, но над пунктом

выпадения радиозонд не обнаруживает слоя с положительной температурой: этот слой находится на значительном удалении от этого пункта, «выше по потоку».

Накопленный опыт расчетов по реальным данным был применен к практической задаче верификации численных прогностических моделей. Задача верификации всегда была актуальной для целей авиационного прогноза, поскольку было замечено, что одна и та же схема постпроцессинга (например, расчета скорости и уровня струйных течений), примененная к продукции различных моделей, дает результаты, сильно различающиеся по степени соответствия реальным атмосферным полям, и что причины этого, ввиду сложности моделей, нелегко указать. Опыт работ [17, 30] позволил в определенных случаях такой анализ провести. Для этого полезно сравнить динамические характеристики, рассчитанные по данным объективного анализа и численного прогноза, и определить, насколько модельная динамика адекватна реальной динамике атмосферы.

Общепринятый подход к задаче оценки точности численных моделей состоит в расчете средних по той или иной области значений ошибок каждого из полей. Обычно у отечественных моделей ошибки несколько больше, чем у лучших моделей мирового класса, однако различия не столь велики. Такая оценка не выявляет слабых мест модельной динамики. Их можно выявить, если в добавление к стандартной процедуре расчета ошибок проводить расчеты динамически и физически содержательных диагностических характеристик по выходным данным моделей и сравнивать их с теми же величинами, рассчитанными по реальным данным (по объективному анализу на срок прогноза), а также с рассчитанными по начальным полям моделей. На первый взгляд, поля давления, температуры, ветра, с которых стартуют различные модели, не сильно отличаются друг от друга. Однако на самом деле глубинные различия этих полей могут быть существенными и приводить к серьезным различиям в результатах.

Так, например, выбрав систему физически содержательных диагностических характеристик, описывающих механизмы генерации восходящих движений (обуславливающих осадкообразование), и произведя их расчеты по модельным полям анализа и прогноза и по «факту» (объективному анализу), оцениваем качество прогностической схемы: степень воспроизводства бароклинических зон, атмосферных фронтов, конвективной неустойчивости, а также потенциал развития динамических механизмов, задаваемый начальными полями моделей.

Применение предложенного метода, который может быть назван «динамической верификацией» [17], позволило выявить причины недостаточности успешного прогноза не только осадков, но струйных течений и топографии тропопаузы в глобальных моделях, продукция которых используется для прогноза особых явлений на верхних уровнях. В тесном контакте с разработчиками численных моделей (в частности, модели

ПЛАВ [42]) удалось добиться некоторого улучшения этих прогнозов и лучшего понимания модельной динамики.

Мониторинг качества авиационных прогнозов в отделе проводится в течение более чем 10 лет. Для этой цели выполняются ежесезонные 10-дневные серии оценок точности прогнозов особых явлений на верхних, средних и нижних уровнях и степень их соответствия требованиям ИКАО. Такой мониторинг отслеживает развитие численного моделирования тех атмосферных полей, на основании постпроцессинга которых рассчитываются авиационные прогнозы.

Все охарактеризованные выше направления деятельности отдела подчинены его основным задачам – разработке методов прогноза особых явлений для авиации (группой разработки) и оперативному прогнозированию (которое производится сотрудниками лаборатории зональных прогнозов). Остановимся вначале на первой из задач.

За последнее десятилетие проведен целый ряд успешных разработок по тематике НИОКР Росгидромета методом постпроцессинга продукции численных моделей. Работы в этом направлении начались еще в 80-е годы XX века, когда были впервые в нашей стране успешно решены задачи прогноза высоты тропопаузы [20], высоты и скорости максимального ветра и струйных течений [4], зон активной конвекции [29], турбулентности в ясном небе [34]. Результаты были использованы для расчета прогностической карты особых явлений на верхних уровнях. В дальнейшем для расчета карты особых явлений на средних уровнях был разработан метод расчета зон вероятного обледенения самолетов, о чем уже упоминалось выше. Все перечисленные методы основаны главным образом на применении закономерностей динамики бароклинических зон и термической конвекции. На следующем этапе развития исследований, при разработке методов прогнозов для нижних уровней и для аэродромов, была решена задача прогноза турбулентности в пограничном слое (термической и механической) на основе продукции модели COSMO-Ru, также с использованием закономерностей мелкой конвекции и колмогоровской турбулентности в атмосфере [31, 35]. Параллельно производилась разработка методов прогноза наличия низкой облачности на аэродромах России и сопредельных стран СНГ, что потребовало учета локальных орографических и циркуляционных условий, сильно варьирующих в пределах рассматриваемых обширных территорий. Такой учет был выполнен Е.И. Ветровой с использованием кластерного анализа, в результате чего была получена «мозаика» районирования территории (рис. 3) по признакам сходства условий на аэродромах определенной группы [2, 21, 37–39]. Еще более детальный учет местных условий потребовался для разработки методов прогноза высоты нижней границы облаков (ВНГО) и горизонтальной дальности видимости на аэродромах [32, 36, 38]: по существу, методы разрабатывались для каждого аэродрома отдельно. Результаты получены методами линейного дискриминантного анализа и пороговых

значений, причем надежное разделение случаев наличия и отсутствия явления (т. е. ВНГО или видимости в определенной градации) удалось получить не для всех аэродромов, а только для 10–15 «крупных» (то есть с круглосуточными наблюдениями через 30 мин), для которых модельные предикторы (относительная влажность, вертикальные градиенты температуры, скорость ветра и др.) наиболее успешно отражают реальные условия на аэродроме.

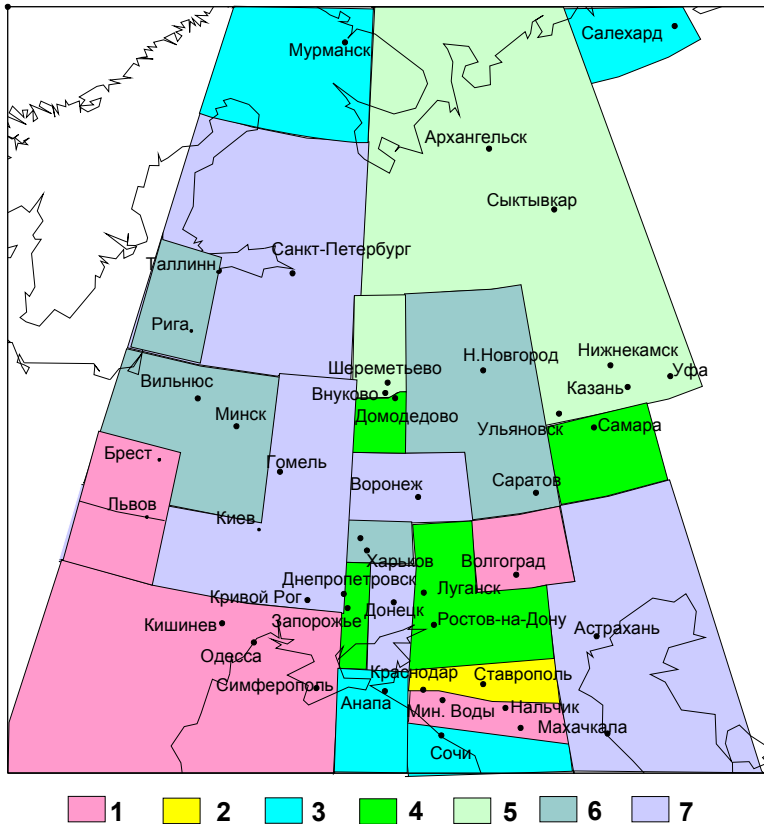


Рис. 3. Разбиение территории европейской части бывшего СССР на участки для расчета карты наличия низкой облачности для 7 кластеров (номера кластеров указаны в нижней части рисунка) [2].
Fig. 3. Dividing the European territory of the former USSR into the parts – 7 clusters – for calculation of the charts of low level cloud occurrence (the cluster numbers are given under the map).

Во всех случаях созданию прогностических методов предшествовало исследование режимных характеристик прогнозируемого явления на конкретном аэродроме (по материалам баз данных METAR), что само по себе представляет значительный научный и прикладной интерес и впервые

производится систематизированно на большом материале. Эти результаты существенно пополняют представления о климате аэродромов. Данное исследование, как и упомянутые выше разработки методов прогноза, в основном выполнялись Е.Н. Скриптуновой.

В 2018–2019 гг. в отделе проводится новаторская разработка, имеющая целью создание метода прогноза орографической турбулентности на основе продукции численной модели. Состояние исследований в наиболее развитых странах по данной проблеме рассмотрено в [19], где также представлены алгоритмы расчетов, позволяющих выделить турбулентные слои в толще атмосферы на основании модельных данных о стратификации температуры, влажности и ветра и о топографии подстилающей поверхности. К настоящему времени получены первые результаты расчетов. Особенность данной программы постпроцессинга состоит в том, что расчеты проводятся на основе данных на модельных уровнях внутри пограничного слоя, а не только на изобарических поверхностях.

Необходимо отметить и такое направление деятельности отдела, как экспертиза летных происшествий (по поручениям Росгидромета). Результаты экспертизы, с анализом всех доступных данных о состоянии атмосферы, становятся предметом публикаций, которые, как правило, привлекают большое внимание как научной общественности, так и авиационных специалистов. Таковы анализ условий катастрофы самолета Boeing 737-800 в Ростове-на-Дону 19.03.2016 г. [28] и случаев обледенения двигателей самолета в кристаллических облаках [22]; несколько более полный обзор работ по последней проблеме дан в [12].

Наконец, отметим опубликование в 2016 г. научно-методического пособия [27] «Прогнозирование метеорологических условий для авиации», в котором обобщены научно-методические вопросы авиационной метеорологии впервые в нашей стране со времени публикации в 1985 г. «Руководства по прогнозированию метеорологических условий для авиации». В книге представлены сведения об условиях образования и способах прогнозирования явлений погоды, влияющих на деятельность авиации, с учетом произошедших в последние десятилетия изменений в практике метеорологического обеспечения авиации, прогресса методов измерений, научных исследований, численных методов прогноза, а также современных требований ИКАО к точности и номенклатуре авиационных прогнозов и введением новых Федеральных авиационных правил.

Наряду с научной и методической деятельностью по разработке и внедрению новых методов авиационного прогноза, в отделе ведется большая оперативная работа силами лаборатории зональных прогнозов, входящей в состав ОАМ (зав. лабораторией – О.Е. Антонович). Продукцией лаборатории являются карты особых явлений на верхних и средних уровнях – всего 24 прогностические карты в сутки. Карта особых явлений на верхних уровнях (7,5–18 км над уровнем моря) выпускается с заблаговременностью 24 и 30 ч с начальных данных от 00 и 12 ч ВСВ

по Северному полушарию, причем его территория разделяется на три части, соответственно строятся три карты для каждого срока и заблаговременности: 1) Евразия (включая Россию); 2) Тихий океан и запад Северной Америки; 3) восток Северной Америки, Атлантический океан, Западная Европа. На этих картах изображаются тропические циклоны со скоростями ветра более 17 м/с, зоны умеренной и сильной турбулентности в облаках и ясном небе, кучево-дождевые облака с верхней границей выше 7 км, высота тропопаузы и струйные течения (уровни максимального ветра и изотахи). Карты особых явлений на средних уровнях (3–7,5 км над уровнем моря) по территории России составляются с теми же заблаговременностями и на основе начальных данных за те же сроки, что и карты особых явлений на верхних уровнях, причем строятся они по трем областям: 1) европейская территория, 2) территория Сибири, 3) Дальний Восток (включая территории Японии и Китая).

Продукция лаборатории зональных прогнозов передается по каналам связи метеорологическим подразделениям, обслуживающим авиацию, и входит в число основных материалов, используемых в оперативной работе. Судя по опросам, проводимым Авиаметтелекомом Росгидромета, и реакцией потребителей на редкие случаи неполучения каких-либо карт (обычно из-за неполадок в системе связи), эта продукция не только широко востребована, но и удостоивается высоких оценок как надежный источник прогностической информации. Продукция внедренных методов прогноза условий взлета, посадки воздушных судов и их полета на нижних уровнях размещается на портале metavia2.ru Авиаметтелекома.

Перспективы развития научных и прикладных исследований в области авиационной метеорологии связаны как с дальнейшими усовершенствованиями методов краткосрочного прогноза опасных для авиации явлений на верхних, средних и нижних уровнях на базе непрерывно совершенствующихся численных прогностических моделей, так и с развитием сверхкраткосрочного прогноза и наукастинга погоды на аэродромах (обзор проблемы дан в [14]) и с комплексным изучением климата с учетом его изменений, в том числе техногенных (некоторые оценки такого рода представлены в [10, 11, 13]). К сожалению, кадровый голод (недопустимо низкий уровень финансирования, препятствующий притоку и удержанию молодых кадров) не позволяет рассчитывать на более широкое развертывание исследований по сравнению с истекшим десятилетием.

Список литературы

1. Бортников С.А., Васильев А.А. Прогноз турбулентности при ясном небе с помощью ЭВМ // Метеорология и гидрология. 1974. № 6. С. 82-85.
2. Ветрова Е.И., Скриптунова Е.Н., Шакина Н.П. Режим низкой облачности и ее прогноз на аэродромах европейской территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 12-31.
3. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 193 с.
4. Иванова А.Р. Методика расчета карты максимального ветра // Метеорология и гидрология. 1989. № 4. С. 59-64.

5. *Иванова А.Р.* Исследование характеристик тропопазузы в полярной зоне по данным радиозондирования на станции Барроу // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 3. С. 18-27.
6. *Иванова А.Р.* Наклон тропопазузы как характеристика ее деформации // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 2. С. 17-29.
7. *Иванова А.Р.* Динамика тропопазузы для случаев резкого изменения общего содержания озона в умеренных широтах Северного полушария // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 6. С. 13-25.
8. *Иванова А.Р.* Тропопауза – многообразие определений и современные подходы к идентификации // *Метеорология и гидрология*. 2013. № 12. С. 23-36.
9. *Иванова А.Р.* Стратосферно-тропосферный обмен и его некоторые особенности во внетропических широтах // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 3. С. 22-43.
10. *Иванова А.Р.* Влияние авиации на окружающую среду и меры по ослаблению негативного воздействия // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы (Труды Гидрометцентра России)*. 2017. Вып. 365. С. 5-14.
11. *Иванова А.Р.* Авиация: вклад в глобальное загрязнение и меры по минимизации экологических рисков // *Труды III Международ конф. «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов. Экологические вызовы XXI века»*, Казань, 2017. С. 362-365.
12. *Иванова А.Р.* Обледенение самолетов в ледяных кристаллах // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы (Труды Гидрометцентра России)*. 2018. № 2 (368). С. 95-109.
13. *Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н.* Об изменении некоторых климатических характеристик на аэродромах Российской Федерации в 2001–2015 гг. // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 5. С. 30-53.
14. *Иванова А.Р., Шакина Н.П.* Перспективы развития наукастинга для метеорологического обеспечения авиации в рамках реализации глобального аэронавигационного плана (ГАНП) // *Труды Гидрометцентра России*. 2016. Вып. 360. С. 113-134.
15. *Иванова А.Р., Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Богаевская Н.И.* Сравнение динамических характеристик блокирующего антициклона лета 2010 г. с более ранними эпизодами // *Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 г. М.: Триада*, 2011. С. 65-71.
16. *Комасько Н.И., Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р.* Векторный фронтотенез как фактор генерации осадков // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 9. С. 5-19.
17. *Шакина Н.П.* Лекции по динамической метеорологии. М.: Триада, 2013. 155 с.
18. *Шакина Н.П.* Выделение зон атмосферных фронтов как задача постпроцессинга результатов численного прогноза // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 1. С. 5-20.
19. *Шакина Н.П.* Механизмы образования орографической турбулентности и ее прогнозирования // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019. № 1 (371). С. 25-47.
20. *Шакина Н.П., Борисова В.В.* Опыт использования потенциального вихря для расчета карт топографии тропопазузы // *Метеорология и гидрология*. 1992. № 9. С. 57-65.
21. *Шакина Н.П., Ветрова Е.И., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Багров А.Н.* Метод краткосрочного прогноза наличия низкой облачности для авиации // *Новые технологии, модели и методы гидрометеорологических прогнозов и результаты их оперативных испытаний*. 2013. Информ. сборник № 40. С. 3-22.
22. *Шакина Н.П., Горлач И.А., Скриптунова Е.Н., Комасько Н.И.* Обледенение двигателей самолета в кристаллических облаках: анализ случая // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 2. С. 85-91.
23. *Шакина Н.П., Иванова А.Р.* Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 11. С. 5-18.
24. *Шакина Н.П., Иванова А.Р., Бирман В.А., Скриптунова Е.Н.* Блокирование: условия лета 2010 г. в контексте современных знаний // *Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 г. М.: Триада*, 2011. С. 6-21.
25. *Шакина Н.П., Иванова А.Р., Комасько Н.И.* Современные представления об атмосферном фронтотенезе. 1. Теоретические положения // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 10. С. 5-18.
26. *Шакина Н.П., Иванова А.Р., Комасько Н.И.* Современные представления об атмосферном фронтотенезе. 2. Некоторые результаты расчетов по реальным данным // *Метеорология и гидрология*. 2014. № 11. С. 5-23.
27. *Шакина Н.П., Иванова А.Р.* Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: Триада, 2016. 310 с.
28. *Шакина Н.П., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н., Горлач И.А.* Крушение самолета Boeing 737-800: метеорологические условия в Ростове-на-Дону 19 марта 2016 г. // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 7. С. 93-98.
29. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н.* Автоматизированный метод прогноза зон активной конвекции // *Метеорология и гидрология*. 1991. № 5. С. 15-19.
30. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н.* Диагноз и прогноз распределения вероятности осадков разной интенсивности // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 8. С. 5-22.

31. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н. Прогноз термической турбулентности в пограничном слое атмосферы для авиации // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 78-100.
32. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н. Режим низкой облачности и прогноз высоты ее нижней границы на аэродромах азиатской территории России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2 (372). С. 59-75.
33. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Горлач И.А. О результатах испытания метода прогноза зон возможного обледенения самолетов // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2010. Информационный сборник № 37. С. 142-153.
34. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Горлач И.А. О результатах испытания метода прогноза турбулентности в ясном небе (ТЯН) // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2010. Информационный сборник № 37. С. 132-141.
35. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Прогноз механической турбулентности в нижнем слое для авиации // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 20-37.
36. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н. Режимные характеристики условий ограниченной видимости на аэродромах азиатской территории России и ближнего зарубежья // Гидрометеорологические исследования и прогнозы (Труды Гидрометцентра России). 2018. № 4 (370). С. 18-35.
37. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Ветрова Е.И. Совершенствование прогнозов погоды для авиации // Международ. науч. конф. по региональн. проблемам гидрометеорологии и мониторинга окруж. среды, Казань, 2-5 окт. 2012 г. Тезисы докладов. 2012. С. 80-81.
38. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Ветрова Е.И., Желнин А.А. Повторяемость низкой облачности на европейской территории бывшего СССР по данным наблюдений на аэродромах // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 348. С. 99-129.
39. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Ветрова Е.И. Возможности прогнозирования высоты нижней границы облаков нижнего яруса на аэродромах европейской части бывшего СССР по данным численных моделей // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 348. С. 5-29.
40. Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 348. С. 130-161.
41. Шакина Н.П., Хоменко И.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Условия образования замерзающих осадков в европейской России и катастрофический гололед в декабре 2010 г. // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Труды междунар. конф. памяти акад. А.М. Обухова, 13-16 мая 2013 г. 2014. С. 405-411.
42. Шаикин В.В., Толстых М.А., Иванова А.Р., Скриптунова Е.Н. Версия модели атмосферы ПЛАВ в гибридной σ -р системе координат по вертикали // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 24-35.

References

1. Bortnikov S.A., Vasil'ev A.A. Prognoz turbulentsi pri yashnom nebe s pomosh'yu EVM. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 1974, no. 6, pp. 82-85 [in Russ.].
2. Vetrova E.I., Skriptunova E.N., Shakina N.P. Low clouds and their forecast at the airports of the European part of the former USSR. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 1, pp 6-19. DOI: 10.3103/S1068373913010020.
3. Gruza G.V., Ran'kova E.Ya. Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata Rossii: temperatura vozduha [Observed and expected climate changes over Russia: surface air temperature]. Obninsk, VNIIGMI-MTSD, 2012, 193 p. [in Russ.].
4. Ivanova A.R. Metodika rascheta karty maksimal'nogo vetra. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 1989, no. 4, pp. 59-64 [in Russ.].
5. Ivanova A.R. Investigation of tropopause characteristics in the polar zone with the use of radio sounding data at Barrow station. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 3, pp 168-174. DOI: 10.3103/S1068373910030027.
6. Ivanova A.R. The tropopause slope as a characteristic of its deformation. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 2, pp. 82-90. DOI: 10.3103/S1068373911020026.
7. Ivanova A.R. Dynamics of the tropopause for the cases of sharp changes in total ozone at the midlatitudes of the northern hemisphere. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 6, pp. 362-370. DOI: 10.3103/S1068373911060021.
8. Ivanova A.R. The tropopause: Variety of definitions and modern approaches to identification. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 12, pp. 808-817. DOI: 10.3103/S1068373913120029.
9. Ivanova A.R. Stratosphere-troposphere exchange and its specific features at extratropical latitudes. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, vol. 41, no. 3, pp. 170-185. DOI: 10.3103/S106837391603002X.

10. Ivanova A.R. Aviation impact on environment and the measures for mitigation of negative effect. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 365, pp. 5-14 [in Russ.].
11. Ivanova A.R. Aviatsiya: vklad v global'noe zagryaznenie i mery po minimizatsii ekologicheskikh riskov. *Trudy III Mezhdunarod konf. «Okruzhayushchaya sreda i ustoychivoe razvitie regionov. Ekologicheskije vyzovy XXI veka»*. Kazan', 2017, pp. 362-365. [in Russ.].
12. Ivanova A.R. Icing of aircraft engines in ice crystals: ways to solve the problem. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, vol. 368, no. 2, pp. 95-109 [in Russ.].
13. Ivanova A.R., Skriptunova E.N. Variations in Some Climatological Characteristics at the Aerodromes of the Russian Federation in 2001–2015. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 5, pp. 302–312. DOI: 10.3103/S1068373918050047.
14. Ivanova A.R., Shakina N.P. Future development of nowcasting for aviation meteorological service in the framework of Global aeronavigation plan (GANP) implementation. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 360, pp. 113-134 [in Russ.].
15. Ivanova A.R., Shakina N.P., Skriptunova E.N., Bogaevskaya N.I. Svrannenie dinamicheskikh harakteristik blokiryuschego antitsyklona leta 2010 g. s bolee rannimi epizodami. Analiz usloviy anomal'noy pogody na territorii Rossii letom 2010 g. Moscow, Triada LTD publ., 2011, pp. 65-71 [in Russ.].
16. Komarov N.I., Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R. Vector frontogenesis as a factor of precipitation generation. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2015, vol. 40, no. 9, pp. 565–575. DOI: 10.3103/S1068373915090010.
17. Shakina N.P. Lektsii po dinamicheskoy meteorologii. Moscow, Triada LTD publ., 2013, 155 p. [in Russ.].
18. Shakina N.P. Identification of zones of atmospheric fronts as a problem of postprocessing the results of numerical prediction. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 1, pp. 1–10. DOI: 10.3103/S1068373914010014.
19. Shakina N.P. Orographic turbulence: generation mechanisms and forecasting. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 371, no. 1, pp. 25-47 [in Russ.].
20. Shakina N.P., Borisova V.V. Opyt ispol'zovaniya potentsial'nogo vihrya dlya rascheta kart topografii tropopauzy. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 1992, no. 9, pp. 57-65 [in Russ.].
21. Shakina N.P., Vetrova E.I., Skriptunova E.N., Ivanova A.R., Bagrov A.N. Metod kratkosrochnogo prognoza nalichiya nizkoy oblachnosti dlya aviatsii. Novye tekhnologii, modeli i metody gidrometeorologicheskikh prognozov i rezul'taty ih operativnykh ispytaniy. *Informatsionnyi Sbornik*, 2013, no. 40, pp. 3-22 [in Russ.].
22. Shakina N.P., Gorchach I.A., Skriptunova E.N., Komarov N.I. Icing of aircraft engines in ice crystal clouds: A case study. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 2, pp. 121-125. DOI: 10.3103/S1068373914020083.
23. Shakina N.P., Ivanova A.R. The blocking anticyclones: the state of studies and forecasting. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 11, pp. 721-730. DOI: 10.3103/S1068373910110014.
24. Shakina N.P., Ivanova A.R., Birman V.A., Skriptunova E.N. Blokirovaniye: usloviya leta 2010 g. v kontekste sovremennykh znaniy. Analiz usloviy anomal'noy pogody na territorii Rossii letom 2010 g. Moscow, Triada LTD publ., 2011, pp. 6-21 [in Russ.].
25. Shakina N.P., Ivanova A.R., Komarov N.I. Present-day concepts of atmospheric frontogenesis. Part 1. Theoretical ideas. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 10, pp. 639-649. DOI: 10.3103/S106837391410001X.
26. Shakina N.P., Ivanova A.R., Komarov N.I. Present-day concepts of atmospheric frontogenesis. Part 2. Some results of computation from the real data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 39, no. 11, pp. 713–726. DOI: 10.3103/S1068373914110016.
27. Shakina N.P., Ivanova A.R. Prognozirovaniye meteorologicheskikh usloviy dlya aviatsii. Moscow, Triada LTD publ., 2016, 310 p. [in Russ.].
28. Shakina N.P., Ivanova A.R., Skriptunova E.N., Gorchach I.A. Boeing 737-800 crash: Weather conditions in Rostov-on-Don on March 19, 2016. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, vol. 41, no. 7, pp. 513-517. DOI: 10.3103/S1068373916070098.
29. Shakina N.P., Skriptunova E.N. Avtomatizirovannyy metod prognoza zon aktivnoy konveksii. *Meteorologiya i Gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 1991, no. 5, pp. 15-19 [in Russ.].
30. Shakina N.P., Skriptunova E.N. Diagnosis and forecasting of the probability spectra of precipitation rate ranges. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 8, pp. 499-510. DOI: 10.3103/S1068373911080012.

31. *Shakina N.P., Skriptunova E.N.* Thermal turbulence in the boundary layer and its forecasting for aviation. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 363, pp. 78-100 [in Russ.].
32. *Shakina N.P., Skriptunova E.N.* Regime of low clouds and ceiling forecasting at the aerodromes in Asian Russia. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, vol. 372, no. 2, pp. 59-75 [in Russ.].
33. *Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R., Gorlach I.A.* O rezultatah ispytaniya metoda prognoza zon vozmozhnogo obledeneniya samoletov. Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. *Informatsionnyi sbornik*. 2010, vol. 37, pp. 142-153 [in Russ.].
34. *Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R., Gorlach I.A.* O rezultatah ispytaniya metoda prognoza turbulentnosti v yasnom nebe (TYAN). Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. *Informatsionnyi sbornik*. 2010, vol. 37, pp. 132-141 [in Russ.].
35. *Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R.* Forecast of mechanical turbulence in the lower atmosphere layer for the aviation. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 364, pp. 20-37 [in Russ.].
36. *Shakina N.P., Skriptunova E.N.* Mean characteristics of limited visibility conditions at the aerodromes in the Asian part of Russia and in the neighboring countries. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, vol. 370, no. 4, pp. 18-35. [in Russ.].
37. *Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R., Vetrova E.I.* Sovershenstvovanie prognozov pogody dlya aviatsii. *Mezhdunarod. nauch. konf. po regional'n. problemam gidrometeorologii i monitoringa okruzh. sredy, Kazan', 2-5 okt. 2012 g. Tezisy dokladov*. 2012, pp. 80-81 [in Russ.].
38. *Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R., Vetrova E.I., Zhelmin A.A.* Occurrence frequency of low clouds in the former European USSR from the aerodrome observation data. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2012, vol. 348, pp. 99-129 [in Russ.].
39. *Shakina N.P., Skriptunova E.N., Ivanova A.R., Vetrova E.I.* Possibilities for low cloud ceiling forecasting at the aerodromes in the former European USSR on the basis of numerical model output data. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2012, vol. 348, pp. 5-29 [in Russ.].
40. *Shakina N.P., Khomenko I.A., Ivanova A.R., Skriptunova Ye.N.* Origination and forecasting of freezing precipitation: review and some new results. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2012, vol. 348, pp. 130-161. [in Russ.].
41. *Shakina N.P., Khomenko I.A., Ivanova A.R., Skriptunova Ye.N.* Usloviya obrazovaniya zamerzayuschih osadkov v evropeyskoy Rossii i katastroficheskiy gololed v dekabre 2010 g. *Turbulentnost', dinamika atmosfery i klimata. Trudy mezhdunarod. konf. pamyati akad. A.M. Obuhova*, 13-16 maya 2013 g. 2014, pp. 405-411 [in Russ.].
42. *Shashkin V.V., Tolstykh M.A., Ivanova A.R., Skriptunova Ye.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.

Поступила в редакцию 05.09.2019 г.

Received by the editor 05.09.2019.