

## Применение карт спутникового диагноза для анализа метеорологических условий в районе авиационного происшествия

М.В. Бухаров<sup>1</sup>, Н.С. Миронова<sup>1</sup>, В.М. Лосев<sup>2</sup>, В.М. Бухаров<sup>2</sup>, Л.А. Мисник<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»,  
123242, Москва, Б. Предтеченский пер., 7,  
e-mail: bmv@planet.iitp.ru

<sup>2</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр России,  
123242, Москва, Б. Предтеченский пер., 9/13,  
e-mail: losev@tmesot.ru

<sup>3</sup>Московский центр автоматизированного управления воздушным движением,  
119027, Москва, Б. Внуковская, 2-А, стр. 9,  
e-mail: ibp.misnik@atcm.ru

Рассмотрено применение карт спутникового диагноза, построенных через каждые 15 минут полета, для оценки опасности метеорологических условий в районе авиационного происшествия. Оценка проведена для всех этапов полета Ан-22 до момента его катастрофы 28 декабря 2010 г. Показано, что в период взлета и набора высоты опасными метеорологическими условиями могли быть замерзание переохлажденного дождя и интенсивное обледенение в облаках. А в районе катастрофы — турбулентность и болтанка на границе резкого уменьшения высоты верхней границы облаков и роста их радиационной температуры. Отмечена полезность применения карт диагноза для предотвращения аналогичных происшествий в холодный период года.

**Ключевые слова:** авиационное происшествие, спутник, радиационная температура, высота облаков, обледенение, турбулентность.

### Введение

Недостаточная пространственная плотность и периодичность наземных метеорологических измерений существенно затрудняют анализ метеорологических условий в районах авиационных происшествий и инцидентов, проводимый по традиционным видам информации (<http://fsfi.avia.ru/news/news/1267453195.shtml>). В таких случаях полезными могут оказаться консультативные карты спутникового диагноза, выпуск которых освоен в НИЦ «Планета» для автоматизированного рабочего места руководителей полетов в Московском центре автоматизированного управления воздушным движением (Бухаров и др., 2008). Карты могут быть построены для любого региона России и примыкающих стран, охватываемых съемкой с геостационарных спутников Meteosat-9, Meteosat-7 и MTSAT, проводимой с периодичностью 15, 30 и 180 мин, соответственно. Построение карт осуществляется на основе результатов автоматизированной дешифровки спутниковой съемки, проводимой с учетом синхронных выходных данных гидродинамической модели регионального прогноза (ГМРП) Гидрометцентра России (Алексеева и др., 2006).

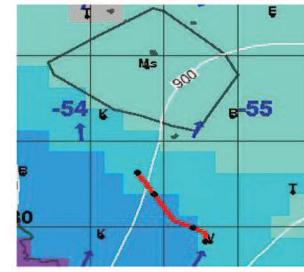
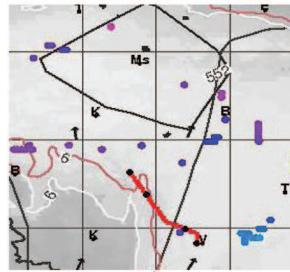
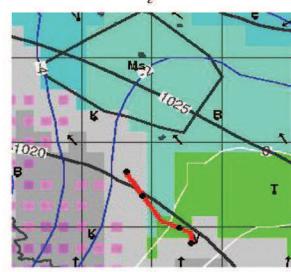
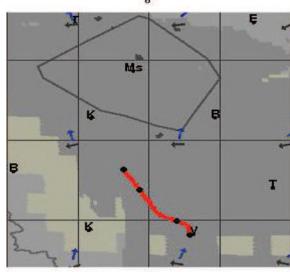
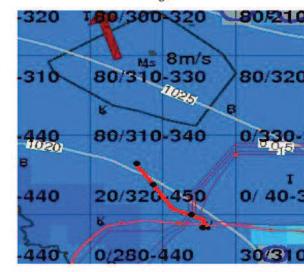
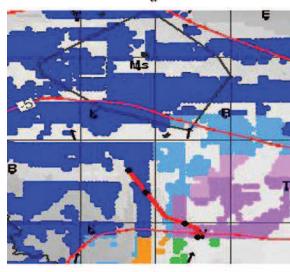
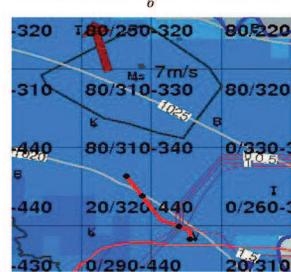
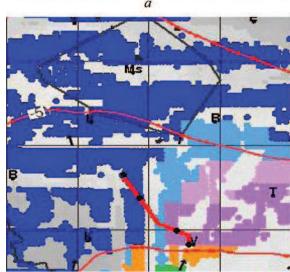
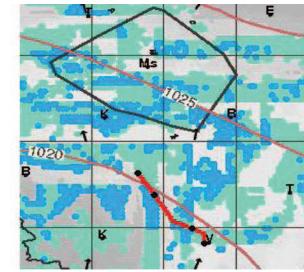
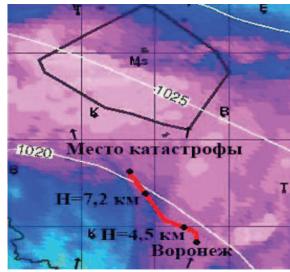
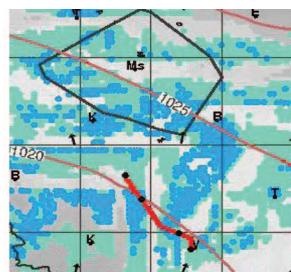
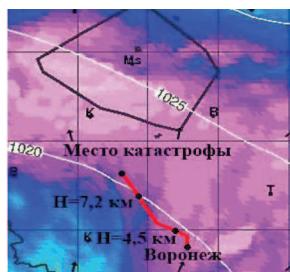
Целью работы является рассмотрение методических вопросов применения карт спутникового диагноза для анализа метеорологических условий в районе авиационного происшествия, случившегося 28 декабря 2010 г. с самолетом Ан-22.

На запрос комиссии по расследованию авиационного происшествия, поступивший в НИЦ «Планета», был разработан специальный комплект карт метеорологической дешифровки информации с геостационарного спутника Meteosat-9 для района от Воронежа до Москвы, имевших максимальную пространственную детальность. На каждую карту нанесен маршрут полета Ан-22 с отметками точек набора конкретных высот полета.

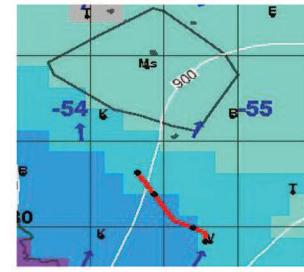
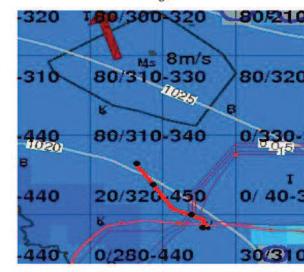
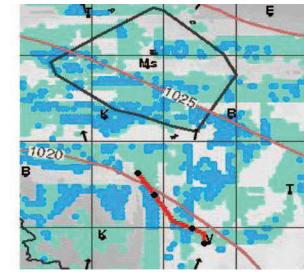
Через каждые 15 мин полета Ан-22 построены следующие карты спутникового диагноза: радиационной температуры, диагностированные метеорологические явления, вероятность гололеда и фазы осадков, интенсивность обледенения в облаках, высота нижней границы об-

лаков, контраст температуры на поверхности 850 гПа, высота верхней границы Св облаков и максимальная скорость ветра в тропосфере.

Описание ранних версий некоторых карт спутникового диагноза представлено в работах (Бухаров и др., 2008; Дмитриева и др., 2011). К настоящему времени ряд карт существенно изменен. Учитывая это, для понимания использованных фрагментов карт, вначале рассмотрим краткие пояснения к ним.



*Рис. 1. Фрагменты карт радиационной температуры (а), диагностированных метеорологических явлений (б), вероятности гололеда и фазы осадков (в), высотных границ слоя сильного обледенения (г), высоты нижней границы облаков (д) и контраста температуры на поверхности 850 гПа (е) в 17 ч 42 мин ВСВ 28.12.2010 г. перед взлетом Ан-22*



*Рис. 2. Фрагменты карт радиационной температуры (а), диагностированных метеорологических явлений (б), вероятности гололеда и фазы осадков (в), высотных границ слоя сильного обледенения (г), высоты верхней границы Св-облаков (д) и максимальной скорости ветра в тропосфере (е) в 17 ч 57 мин 28.12.2010 г. в период набора высоты Ан-22*

### Пояснения к картам спутникового диагноза

Фрагменты карт, построенных для анализа метеорологических условий перед взлетом, в период набора высоты и в моменты до и после катастрофы Ан-22, представлены на рис. 1, 2 и 3 соответственно. Красная линия на карте соответствует маршруту полета Ан-22 от Воронежа до района катастрофы. Черные точки на линии маршрута соответствуют участкам набора высот полета 4,5 и 7,2 км, которые на рис. 1а, 2а и 3а, б обозначены соответствующими цифрами. На всех картах и в тексте принято всемирное скоординированное время (ВСВ).

Отметим следующие важные для анализа отличия разработанных карт диагноза от обычно используемых исходных снимков с геостационарного спутника Meteosat-9:

1) максимально точная географическая привязка облаков разной высоты и диагностируемых явлений, достигнутая за счет устранения искажений (параллакса) в исходной привязке верхней границы облаков; искажения в привязке облаков возникают в тех районах, которые существенно удалены от подспутниковой точки (Бухаров и др., 2007);

2) максимально точное время спутниковой съемки интересующего района, которое для Meteosat-9 рассчитывается по географической широте района и может быть определено по графикам, представленным в работе (Бухаров и др., 2007). Согласно этим графикам, время съемки района полета Ан-22 ( $\sim 52^{\circ}$  с.ш.) примерно на 3 мин меньше момента окончания каждого 15-минутного цикла спутниковой съемки.

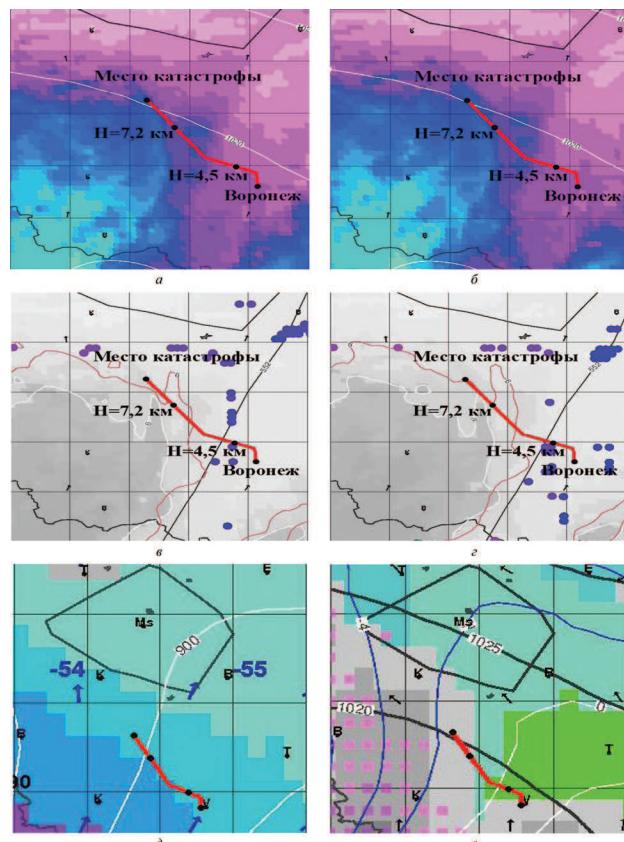


Рис. 3. Укрупненные фрагменты карт радиационной температуры (а, б) и высоты верхней границы Cb-облаков (в, г), и фрагменты карт максимальной скорости ветра в тропосфере (д) и контраста температуры на поверхности 850 гПа (е) в 18 ч 12 мин (а, в, д, е) и в 18 ч 27 мин (б, г) 28.12.2010 г.

Максимальная точность карт спутникового диагноза по географической привязке облачности и времени съемки, а также небольшой интервал (15 мин) между съемками позволяют анализировать метеорологические условия полета с высокой детальностью. Для реализации этой детальности необходимо, чтобы информация об особых точках маршрута полета воздушного судна была сообщена с погрешностью не хуже, чем 1 мин по времени, 1 мин по географической широте и долготе и 0,1 км по высоте полета.

Принятый на всех картах диагноза размер унифицированного пикселя спутниковой съемки составляет  $0,1^{\circ}$  географической широты и долготы ( $\sim 11\ldots6$  км).

Для оценки синоптических условий на карты (рис. 1а, б, г-е, 2а, б, г и 3а, б, е) нанесены изобары давления на уровне моря (белые, либо цветные линии с цифрами) и направления переноса облаков на изобарической поверхности 500 гПа (черные стрелки). Информация о давлении и направлении переноса рассчитывается по выходным данным ГМРП на момент спутниковой съемки территории России. Пространственная детальность выходных данных ГМРП составляет  $0,5^{\circ}$  географической широты и долготы.

Полное описание принятых обозначений приводится на каждой карте спутникового диагноза. Для фрагментов карт, представленных на рис. 1–3, ниже приведены пояснения и краткое описание используемой части легенд.

### *Карта радиационной температуры*

Фрагменты карт радиационной температуры ( $T_p$ ) представлены на рис. 1 $a$ , 2 $a$  и 3 $a$ , б. Значения  $T_p$  измеряются с геостационарного спутника Meteosat-9 в диапазоне 10...11 мкм и примерно соответствуют температуре на верхней границе облаков.

Трассируется с погрешностью менее 1 °C. Принятая на картах цветовая палитра позволяет визуально оценивать  $T_p$  с дискретностью 2 °C для  $T_p < -60$  °C и 4 °C для  $T_p \geq -60$  °C.

Для распознавания низкой (более теплой) и высокой (более холодной) облачности используются оттенки синего и фиолетового цвета. Чем светлее фиолетовый тон, тем ниже температура и больше высота верхней границы облаков. Чем светлее синий тон, тем теплее верхняя граница облаков и меньше ее высота.

### *Карта метеорологических явлений*

Фрагменты карт метеорологических явлений представлены на рис. 1б и рис. 2б. Районы, где возможны слабые и умеренные осадки выделены светло зеленым и синим цветами соответственно.

Автоматизированное распознавание осадков проводится по значениям радиационной температуры с учетом вертикального профиля температуры и влажности атмосферы в районе (по данным ГМРП) на момент спутниковой съемки (Алексеева и др., 2006).

### *Карта вероятности гололеда и фазы осадков*

Фрагменты карт вероятности гололеда и фазы осадков представлены на рис. 1в и 2в. Районы, где возможно замерзание переохлажденных осадков (гололед), мокрый снег, сухой снег, дождь и дождь со снегом отмечены фиолетовым, светло синим, синим, зеленым и оранжевым цветами соответственно. Чем больше вероятность гололеда, тем темнее его фиолетовый тон на карте.

Автоматизированное распознавание вероятности гололеда и фазы осадков проводится по значениям радиационной температуры с учетом вертикального профиля давления, температуры и влажности атмосферы (по данным ГМРП) на момент спутниковой съемки.

### *Карта интенсивности обледенения в облаках*

Фрагменты карт интенсивности обледенения представлены на рис. 1г и 2г. Районы, где диагностирована возможность интенсивного обледенения (более 1 мм/мин при полете со скоростью ≈ 300 км/ч), нанесены синим цветом. Чем выше высота верхней границы слоя интенсивного обледенения, тем темнее его синий цвет на карте.

Цифрами (например, 0/290-440) на картах обозначены минимальная (0 дкм) и максимальная (от 290 до 440 дкм) высоты нижней и верхней границ слоя интенсивного обледенения в пределах районов протяженностью  $1,5 \times 4^\circ$  географической широты и долготы.

Автоматизированная оценка интенсивности обледенения проводится по значениям вертикального профиля температуры (погрешность ~2 °C) и влажности атмосферы на момент спутниковой съемки. Профиль влажности, рассчитываемый по ГМРП, уточняется по спутниковой информации с учетом распознанных типов облаков. Для контроля на карту нанесены: положение изотермы 0 °C у земной поверхности (красная линия средней толщины) и высоты (км) изотерм 0 °C в атмосфере (красные линии меньшей толщины).

### *Карта высоты нижней границы облаков*

Фрагмент карты высоты нижней границы облаков ( $H_{nro}$ ) представлен на рис. 1д. Расчитываемые значения  $H_{nro}$  наносятся на карту с дискретностью 250 м. Районы, где  $H_{nro}$  из-

меняется в диапазонах 0...250 и 500...750 м, выделены темно серым и салатовым цветами, соответственно.

Автоматизированная оценка высоты нижней границы облаков (погрешность ~300 м) проводится по значениям вертикального профиля температуры и скорректированного профиля влажности атмосферы на момент спутниковой съемки. Для оценки динамики изменения со временем высоты нижней границы в интересующем районе, на карту дополнительно нанесены направления ветра у земли (черные стрелки) и направления переноса на поверхности 500 гПа (синие стрелки).

### *Карта фронтальных контрастов*

Фрагменты карт фронтальных контрастов представлены на рис. 1 $e$  и 3 $e$ . Карты строятся по выходным данным ГМРП о значениях температуры воздуха и геопотенциала на уровне 850 гПа, а также рассчитанным значениям горизонтальных контрастов температуры на 850 гПа и пространственной изменчивости направлений градиентного ветра у земли. Положительные значения температуры на 850 гПа нанесены палитрой от светло зеленого до красноватого, а отрицательные — от светло-синего до синего цвета.

Разными оттенками серого цвета выделены контрасты температуры воздуха на уровне 850 гПа, превышающие 1,5 °С на 100 км. Значения пространственной изменчивости направления ветра у земли, превышающие 15° на 100 км, нанесены только для зон сходимости ветра в циклонах и барических ложбинах, и представлены в виде квадратов уменьшенного размера. На карту нанесены (через 2 °С) белые ( $\geq 0$  °С) и синие ( $< 0$  °С) линии изотерм и направления переноса (стрелки) атмосферы на уровне 850 гПа.

### *Карта высоты верхней границы Cb облаков*

Фрагменты карт высоты верхней границы кучево-дождевых (Cb) облаков ( $H_{\text{вgo}}$ ) представлены на рис. 2 $d$  и 3 $v, g$ . Автоматизированная оценка  $H_{\text{вgo}}$  проводится по значениям радиационной температуры с учетом вертикального профиля температуры в атмосфере на момент спутниковой съемки. Для диагностированных Cb-облаков проводится дополнительная коррекция значений  $H_{\text{вgo}}$  по их статистической взаимосвязи с данными метеорологических радиолокаторов (Алексеева и др., 2006). Погрешность оценки  $H_{\text{вgo}}$  облаков ~0,3 км.

Рассчитанные значения  $H_{\text{вgo}}$  наносятся на карту послойно. Сначала разными градациями серо-белого цвета наносятся  $H_{\text{вgo}}$  (от 0 до 15 км) облаков нижнего (темные тона), среднего (серые тона) и верхнего (светлые) ярусов. Затем цветовой палитрой наносятся значения  $H_{\text{вgo}}$  (от 7 до 15 км) распознанных Cb-облаков.

Текущее положение границы облаков верхнего яруса с  $H_{\text{вgo}} \geq 6$  км выделено белым контуром, а ее положение, ожидаемое через 1 ч, нанесено коричневым контуром. Для распознавания синоптической ситуации на карту дополнительно нанесены изогипсы поверхности 500 гПа (черные линии с цифрами — высоты в дкм) и направление переноса (черные стрелки) на ней.

### *Карта максимальной скорости ветра в тропосфере*

Фрагменты карт максимальной скорости ветра в слое 925...100 гПа представлены на рис. 2 $e$  и 3 $d$ . Карта строится по выходным данным ГМРП о значениях геопотенциала и температуры воздуха на уровнях от 925 до 100 гПа. Рассчитываемые значения максимальной скорости ( $V_{\text{max}}$ ) наносятся на карту разными цветами. Районы, где  $V_{\text{max}}$  изменяется в диапазонах от 40...60 до 80...100 км/ч, представлены палитрой от светло-синего цвета до синего соответственно. Пространственная детальность информации на карте составляет 0,5° географической широты и долготы.

Дополнительно на карту нанесены значения температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ , синие цифры), направления переноса (синие стрелки) и высота (в дкм) изобарической поверхности 300 гПа, вблизи которой в большинстве случаев наблюдаются максимальные скорости.

## Анализ метеорологических условий

**Взлет Ан-22 (в 17 ч 51 мин ВСВ) и набор высоты 4500 м (в 18:02).** Для анализа воспользуемся фрагментами карт спутникового диагноза в моменты времени 17:42 и 17:57, которые представлены на рис. 1 и 2.

Фиолетовый цвет на рис. 1 $a$  и 2 $a$  свидетельствует о том, что над районом Воронежа в это время наблюдалась обширная фронтальная облачность в передней части циклона, смещающаяся в северо-северо-восточном направлении (по направлению черной стрелки). Светло-зеленый цвет на рис. 1 $b$  и 2 $b$  указывает на возможность в этом районе слабых осадков и умеренную вероятность замерзающей мороси (гололед — фиолетовый цвет на рис. 1 $c$  и 2 $c$ ) до высоты 1 км севернее Воронежа. Оценочная температура воздуха составила примерно  $-0,2\ ^{\circ}\text{C}$  у земли (рис. 1 $c$ ),  $0\ ^{\circ}\text{C}$  на высоте 1 км (рис. 1 $d$ ) и  $0,5\ ^{\circ}\text{C}$  на поверхности 850 гПа (рис. 1 $e$ ).

Синий цвет на картах рис. 1 $g$  и 2 $g$  указывает на возможность интенсивного обледенения в слое облаков (до высот 3200...4400 м). Оценочная высота нижней границы облаков не превышает 250 м (темный цвет на рис. 1 $d$ ), а верхней границы облаков — более 6 км (светлый тон на рис. 2 $d$ ). Набор высоты проходил в районе с незначительными температурными контрастами (менее  $1,5\ ^{\circ}\text{C}/100\ \text{км}$ ) на поверхности 850 гПа (рис. 1 $e$ ) и на антициклонической периферии под струйным течением (рис. 2 $e$ ).

**Набор высоты от 4500 (в 18:02) до 7200 м.** Этот участок маршрута Ан-22 представлен на фрагментах карт рис. 2 (съемка в 17:57) и рис. 3 (18:12) между второй и третьей точками на красной линии, начинающейся от Воронежа. Согласно рис. 2 $d$ , маршрут проходил через облака с высотой верхней границы от 6 до 8 км, в которых возможно только умеренное и слабое обледенение (рис. 2 $g$ ). Температура на верхней границе облаков от  $-50$  до  $-40\ ^{\circ}\text{C}$  (рис. 2 $a$  и 3 $a$ ). Набор высоты проходил в районе расходимости изогипс в передней части высотного циклона (рис. 3 $d$ ).

**Условия полета на эшелоне 7200 м (FL240) в районе происшествия (в 18:23).** Для анализа рассмотрим фрагменты карт за время 18:12 и 18:27, которые представлены на рис. 3, где этот участок маршрута отмечен точкой ( $H = 7,2$  км) и до конца красной линии (района катастрофы).

Согласно рис. 3 $a$ ,  $b$ , в районе происшествия наблюдается резкое изменение (примерно на  $10\ ^{\circ}\text{C}$ ) цвета радиационной температуры облаков от темно-фиолетового до светло-синего. Это изменение имеет вид узкого светло-синего клина, соответствующего более низкой облачности. Верхняя граница облаков в пределах этого клина близка к 6 км и меньше, а на его краях превышает 8 км (рис. 3 $e$ ). Такой характер изменения Нвго указывает на то, в районе катастрофы самолета возможна резкая смена крупномасштабных вертикальных движений и развитие атмосферных вихрей, масштабы которых соизмеримы с размерами самолета (Баранов и др., 1992). При этом возможно и возникновение явления «болтанка у стены облаков», которое обусловлено уменьшением тяги и подъемной силы при выходе из облачного массива (Баранов и др., 1992). На возможность турбулентности в этом районе указывает и расходимость изогипс (рис. 3 $d$ ) в передней части высотного циклона (Баранов и др., 1992).

В этом районе одновременно отмечены повышенные значения влажности атмосферы (по возможности интенсивного обледенения в облаках до высот 3,2...4,5 км, рис. 2 $g$ ) и максимальной скорости ее переноса ( $\sim 80\ \text{км}/\text{ч}$ , рис. 3 $d$ ), а также увеличенные контрасты температуры воздуха на поверхности 850 гПа (рис. 3 $e$ ).

Таким образом, возможными опасными для полета явлениями погоды на маршруте Ан-22 28 декабря 2010 г. в период с 17:42 до 18:23 могли быть:

- переохлажденный дождь и интенсивное обледенение в облаках в районе взлета и набора высоты до 4,5 км;
- дополнительное умеренное и слабое обледенение в облаках при наборе высоты от 4,5 до 7,2 км;
- нисходящие потоки и вихри, турбулентность и явление «болтанка у стены облаков», которые обычно возникают на границе резкого изменения радиационной температуры облаков и уменьшения высоты их верхней границы, наблюдаемое по фрагментам карт рис. 3а–г, ближайшим к моменту катастрофы Ан-22.

Отметим, что карты спутникового диагноза были запрошены и для анализа метеорологических условий в районе инцидента с Ил-62М, который произошел 8 февраля 2012 г. над Арменией. По сообщению пилотов, при снижении с высоты 5700 до 4800 м (вблизи аэродрома Ереван), возникла не прогнозированная сильная турбулентность, болтанка и броски воздушного судна.

Нанесение с максимальной пространственной детальностью маршрута полета Ил-62М на карты диагноза показало, что в районе инцидента радиационная температура и Нвго облачности также обладали большой пространственной изменчивостью в виде вытянутой узкой полосы резкого увеличения  $T_p$  на 28...30 °C и соответствующего уменьшения (на 3–7 км) значений  $H_{\text{вгю}}$ . Одновременно в этом районе диагностирована большая (свыше 100 км/ч) скорость переноса атмосферы и ее повышенная влажность, при которой в облаках возможно интенсивное обледенение до высоты 4,9 км.

Комплекс подобных метеорологических условий, диагностированный в районах катастрофы Ан-22 и инцидента с Ил-62М, можно рассматривать как опасный для полетов авиации в холодный период года. Поэтому оперативное распознавание таких условий по картам диагноза, поступающим в реальном времени (Бухаров и др., 2008), может позволить предотвратить повтор аналогичных происшествий и инцидентов.

## Литература

1. Алексеева А.А., Бухаров М.В., Лосев В.М., Соловьев В.И. Диагноз осадков и гроз по измерениям уходящего теплового излучения облачности с геостационарных спутников // Метеорология и гидрология. 2006. № 8. С. 33–42.
2. Баранов А.М., Богаткин О.Г., Говердовский В.Ф., Еникеева В.Д. Авиационная метеорология. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 347 с.
3. Бухаров М.В., Кухарский А.В., Мисник Л.А. Автоматизированное рабочее место «Планета-метеообзор» для мониторинга опасных атмосферных явлений, связанных с конвективной облачностью // Метеорология и гидрология. 2008. № 2. С. 64–69.
4. Бухаров М.В., Миронова Н.С., Ущеко И.Г. Методические вопросы верификации результатов автоматизированного распознавания осадков и гроз по информации с геостационарных спутников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. № 2. С. 40–45.
5. Дмитриева Т.Г., Бухаров М.В., Песков Б.Е. Анализ условий возникновения сильных шквалов по спутниковой и прогностической информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 244–250.

# **Application of maps of the satellite diagnosis for the analysis of meteorological conditions in area of air incident**

**M.V. Bukharov<sup>1</sup>, N.S. Mironova<sup>1</sup>, V.M. Losev<sup>2</sup>, V.M. Bukharov<sup>2</sup>, L.A. Misnik<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *State Research Center on Space Hydrometeorology PLANETA,  
123242 Moscow, B. Predtechensky Per., 7,  
e-mail: bmv@planet.iitp.ru*

<sup>2</sup> *State Research Center on Hydrometeorology 123242, Москва,  
123242 Moscow, B. Predtechensky Per., 9/13,  
e-mail: losev@mecom.ru*

<sup>3</sup> *State ATM Corporation Branch Moscow Air Traffic Control Centre,  
119027, Moscow, B. Vnukovskaja, 2-A, bld. 9,  
E-mail: ibp.misnik@atcm.ru*

The application of the satellite diagnosis maps, which is let out through everyone 15 minutes of flight, for an estimation of danger of meteorological conditions in area of air incident is considered. The estimation is made for all stages of flight of the An-22 aircraft up to the moment of its accident of December 28, 2010. Is shown, that during takeoff and set of height of flight dangerous meteorological conditions could be freezing of the overcooled rain and intensive icing in clouds. And in area of accident — turbulence on border of sharp change of radiating temperature and height of the top border of a cloudy cover. The utility of application of maps of the diagnosis for prevention of similar incidents in the cold period of year is noted.

**Keywords:** air incident, satellite, radiating temperature, height of clouds, icing, turbulence.