

ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАДИАЦИОННИТЕ МЪГЛИ НА ЛЕТИЩЕ ПЛОВДИВ

НИКОЛАЙ РАЧЕВ¹, РУМЕН РАЙКОВ², АНГЕЛ РУСЕВ²

¹*Катедра „Метеорология и геофизика“*

²*Метеорологичен център на ВВС, София*

Николай Рачев, Румен Райков, Ангел Русев. ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАДИАЦИОННИТЕ МЪГЛИ НА ЛЕТИЩЕ ПЛОВДИВ

В настоящата работа са изследвани режимът и характеристиките на радиационните мъгли на летище Пловдив. Определени са: честотата на поява на мъглите; тяхната продължителност; времето на формиране и разсейване; влиянието на вятъра, облачността, приземните влажност и температура при образуване и разсейване на мъглите. Получени са регресионни уравнения, даващи зависимостта на температурата на падане на радиационните мъгли от температурата и точката на оросяване, измерени няколко часа преди формирането на мъглата. Получена е и зависимостта на температурата на разсейване на мъглата от температурата при падането ѝ. Показано е, че регресионните уравнения могат да бъдат успешно използвани при прогноза на радиационните мъгли на летище Пловдив.

Nikolay Rachev, Rumen Raykov, Angel Rusev. STUDY OF RADIATION FOGS AT PLOVDIV AIRPORT

Characteristics of radiation fogs at Plovdiv Airport are studied. The frequency of fog occurrence; time of formation and dissipation; duration, the impact of wind, cloudiness, humidity and temperature in the formation and dissipation of fog are determined. Regression equations giving the dependence of temperature of the radiation fog from temperature and dew point, measured a few hours before the fog formation were obtained. The equation for the dissipation fog temperature is obtained, also. It is shown that the regression equations can be successfully used to forecast radiation fogs at Plovdiv Airport.

Keywords: fog

PACS numbers: 92.60.-e

За контакти: Румен Райков, София 1616, кв. Бояна, ул. „Брезовица”, тел: 02/9228702, факс: 02/9228705, E-mail: rumen_raykov@abv.bg

1. УВОД

Усъвършенстването на летателните апарати, подобряването на наземното техническо оборудване на летищата, все по-широкото използване на радиолокационна и инфрачервена техника улесняват работата на пилотския състав, като правят по-сигурно пилотирането на самолетите. Въпреки тези постижения, съвременната авиация все още е в значителна степен зависима от някои характеристики на времето – далечина на видимостта, долна граница на облачността, посоката и скоростта на вятъра и др. Долната граница на облачността и видимостта са най-важните метеоеlementи, определящи сложността на метеорологичните условия по време на полета.

Изследването на режима и характеристиките на мъглите за всяко едно конкретно летище и надеждното им прогнозиране е важна задача, доколкото падането на мъглата пречатства кацането на вече излетели въздухоплавателни средства и води до затваряне на съответното летище – невъзможност да бъде използвано като запасно.

В Метеорологичния център на Военновъздушните сили (МЦ на ВВС) е предприето мащабно изследване на редица опасни за авиацията метеорологични явления с цел създаване на методики за климатологична подкрепа и повишаване на качеството на прогнозите при подготовка и реализиране на военните операции. Настоящата разработка има за цел да изследва приложимостта на една нова методика за оценка характеристиките на радиационните мъгли над летище Пловдив, базирана на климатично проучване, и да бъде направен опит за прогноза на температурите на падане и на разсейване на радиационна мъгла на конкретното летище.

Първата част на изследването има за задача да проведе климатично проучване, което да анализира честотата на поява на радиационни мъгли на територията на избраното летище и да се определят стойностите на някои метеоеlementи, свързани с появата и разсейването на мъглите в района един час преди, в часа на поява и в часа на разсейване на мъглата.

Втората част на изследването има за задача да проведе регресионен анализ и да се намери зависимост, даваща възможност да се направи прогноза на температурата на формиране на радиационна мъгла и съответно температурата на разсейването ѝ, по данни за температурата на въздуха и точката на оросяване, определени няколко часа преди падането на мъглата. Изборът на статистически метод за прогнозиране на мъглата е обусловен най-вече от наличието на регулярен поток метеорологична информация от летищната метеослужба. Тенденция при развитие на статистическите методи за прогнозиране на мъгли е те да се разработват и

прилагат за определени места, а не да се търсят общи (глобални) методи за прогноза [1]. По този начин, макар и неявно, при прогнозата се отчитат и редица локални особености.

Третата част на изследването цели да бъде направена проверка за приложимостта на получените регресионни уравнения върху независима извадка от данни (използвани са данни за периода 2012–2014 г.) и да се оцени възможността за използване в оперативната практика на МЦ на ВВС на разработената методика за прогноза на мъглите на летище Пловдив.

2. ОБРАЗУВАНЕ И РАЗСЕЙВАНЕ НА РАДИАЦИОННИ МЪГЛИ. МЕТОДИ ЗА ПРОГНОЗА

В зависимост от физичните процеси, водещи до образуването на мъгли, те се разделят на мъгли на охлаждане и мъгли на изпарение [2]. От своя страна мъглите на охлаждане се разделят на радиационни, адвективни, адвективно-радиационни, орографски. При мъглите на охлаждане кондензацията настъпва вследствие на изстиване на приземния въздух, при което съдържащата се в него водна пара достига състояние на насищане. На сушата те са най-разпространеният тип. В настоящата работа се разглеждат основно радиационните мъгли, главна причина за образуването на които е охлаждането на въздуха в резултат от нощните загуби на топлина от земната повърхност вследствие на дълговълновото излъчване (радиационно изстиване). Най-подходящи за образуването на радиационни мъгли са нощи с ясно небе, приземна инверсия на температурата, слаб вятър (до 3 m s^{-1}) и висока относителна влажност на въздуха. Максималната повторемост на образуване на радиационни мъгли е в края на нощта до 1–2 часа преди изгрева на слънцето, а максимална повторемост на разсейване се достига 2–3 часа след изгрев [2].

За надеждното прогнозиране на формирането и еволюцията на радиационните мъгли се изисква наличие на голям обем микрометеорологична информация, включваща: вертикално разпределение на температурата и влажността в приземния слой; температура и влажност на земната повърхност; устойчивост на атмосферата в приземния слой и свързаните с нея турбулентни потоци топлина и влага; състояние на облачната покривка; скорост на вятъра; наличие на кондензационни ядра в атмосферата и др. Подобен вид информация е налична само при провеждане на специализирани научни експедиции и затова стремежът е да се използват данните от стандартните метеорологични приземни измервания и аерологичните сондажи [2, 3]. Най-често при прогноза на радиационна мъгла се използват подходи, базирани на информация за

температурата на въздуха и точката на оросяване [4, 5]. Предложени са и редица методи за прогноза на мъглите с използване на спътникова информация и моделни резултати от числени прогнози на времето [1].

Разработени са много и различни методи за прогноза на радиационните мъгли по данни за приземните температура и точка на оросяване. Такова многообразие от методи се дължи не само на различните възможности за възникване на мъгла, но и на съществената зависимост от местните условия. Някои методи използват измерените преди залеза на слънцето температура (T) и точка на оросяване (T_d), прогнозната минимална температура, определена от синоптичната прогноза, и определят температурата на възникване на радиационна мъгла [6]. Задачата за прогноза на образуването на мъгла се свежда до прогноза на нощното понижение на температурата и на точката на оросяване. Обикновено при тези методи се построяват номограми, по които сравнително лесно се определя не само температурата на падане на мъглата (димката), но и нейната интензивност. Проблем при използването на номограмите е, че те са построени чрез използване на данни от метеорологични измервания над определена територия и при прилагането им за друго място резултатите са ненадеждни поради неотчитането на местните физико-географски особености [4, 6]. Прогнозата се подобрява съществено, ако се използват статистически данни за образуването на радиационни мъгли над конкретния пункт на наблюдение.

Разработени са и методи за прогноза на радиационни мъгли, чрез които може да се определи не само температурата, а и часът на образуване и разсейване на радиационните мъгли. Такива методи се използват в оперативната работа на синоптиците. Идеята им е по данни за измерените температура и точка на оросяване през последните няколко часа преди залеза на слънцето да се определи тенденцията за понижаване на температурите през нощта. Пресечната точка на прогнозните линии на T и T_d съответства на момента на образуване на димка, а при продължаващо радиационно охлаждане се достига и моментът на образуване на мъгла [6].

По аналогичен начин се прогнозира и времето на разсейване на мъглата. Радиационните мъгли почти винаги се разсейват след изгрева на слънцето. При предположение, че общото съдържание на вода в приземния слой на атмосферата не се е променило след падането на мъглата, времето за разсейване на мъглата ще се определя от интервала време, в течение на който температурата на подгрявания от земната повърхност въздух достига точката на оросяване при залез слънце. Повишението на температурата след изгрева на слънцето се определя по данни от преки измервания на конкретното място за дадения сезон [4].

3. КЛИМАТИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА МЪГЛИТЕ В РАЙОНА НА ЛЕТИЩЕ ПЛОВДИВ

Честотата на възникване на мъгли и тяхното разпределение на територията на България зависят от много фактори, но най-вече от физико-географските особености на района и от циркулационните условия. Броят на дните с мъгла през годината за територията на Тракийската низина е от 30 до 50. За отдалечените от Черно море райони на България в около 50 % от случаите с мъгла тя е радиационна [2]. Благоприятна синоптична обстановка за образуване на радиационни мъгли в студеното полугодие е, когато територията на България попада в централната част на антициклон, простиращ се над голяма част от Европа [2]. Това осигурява тихо и почти безоблачно време и значително изстиване на приземния въздух. Продължителността на мъглите е 1–2 дни (и повече), дисипират, когато се разрушат баричният гребен и приземната инверсия на температурата.

3.1. ИЗПОЛЗВАНИ ДАННИ

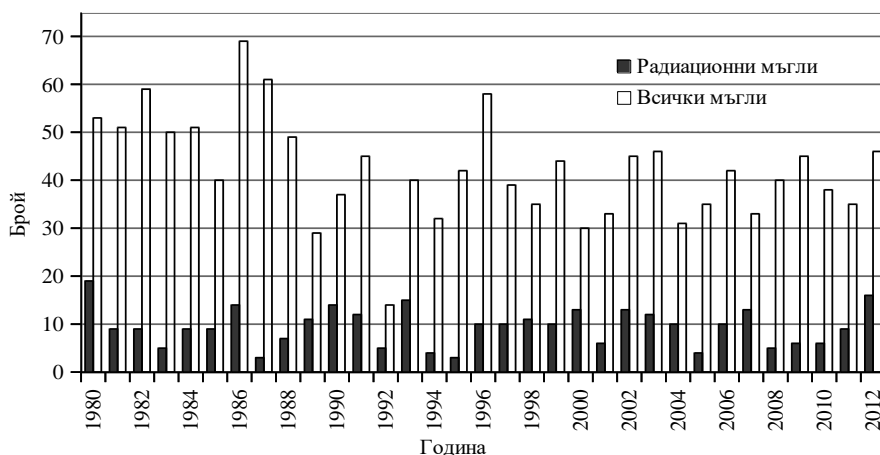
В настоящото изследване са използвани данни от наблюдения от цифровизираната метеорологична база данни (МБД) на МЦ на ВВС. Тя съдържа информация от ежечасни наблюдения в десетки метеорологични станции. Данните съдържат пълната гама от реализации на приземните метеорологични параметри за пункта, в който се извършват наблюденията. Със своята непрекъсната ежечасна информация за период над 35 години, МБД на МЦ на ВВС е уникална за България. За целите на настоящото изследване от МБД на МЦ на ВВС чрез специализирани софтуерни продукти при зададени критерии за подбор е селектирана метеорологична информация, събирана на летище, намиращо се в района на гр. Пловдив. Използваните данни при климатичното изследване на мъглите в района на летището са за периода от 01.01.1980 г. до 31.12.2011 г. Нямаме сведения в България да е изследван по-дълъг ред от данни (280512 ежечасни телеграми) за описание и прогноза на мъглите.

През разглеждания период от 32 години са регистрирани общо 1351 случая на падане на мъгла. Общата продължителност на мъглите е 9591 часа (400 дни) или около 3,4 % от продължителността на разглеждания период. За целите на настоящото изследване са потърсени критерии, по които да бъде направено разделяне на случаите с радиационни мъгли от останалите видове мъгли. Резултати от предишни изследвания [2, 3, 6] показват, че вероятността за образуване на радиационни мъгли е по-голяма при отсъствието на силни ветрове и на плътна облачна покривка. В съответствие с тези резултати за открояване на радиационните мъгли са

зададени следните условия: 1. В продължение на 5 часа преди падане на мъглата максималната скорост на приземния вятър да е под 3 m s^{-1} . 2. Максималното количество облачност да е под 5/10. На тези условия отговарят 296 случая от общия брой регистрирани мъгли, съответно около 22 % като брой и около 25 % като продължителност в часове. Трябва да се отчете факта, че наложените критерии при отделянето на радиационните мъгли от останалите мъгли са доста ограничителни и изключват някои случаи на радиационни мъгли, образували се при стихване на вятъра или намаляване на облачността в интервала 1–4 часа преди падането на мъглата.

3.2. ЧЕСТОТА НА РАДИАЦИОННИТЕ МЪГЛИ

През изследвания период средният брой радиационни мъгли на година е 9, а средната годишна продължителност е 74,5 часа. На фиг. 1 са представени общият брой мъгли и само на радиационните мъгли на летище Пловдив за разглеждания период. Очевидна е значителната междугодишна изменчивост на общия брой на мъглите, който е минимален през 1992 г. (14) и максимален през 1986 г. (69). От фигурата се вижда също намаляване на общия брой на мъглите след първите 10 години на разглеждания период. Възможно обяснение на тази тенденция е намаляването на емисиите на индустриални замърсители в атмосферата.



Фиг. 1. Разпределение на случаите с мъгла по години за летище Пловдив

По отношение на броя на радиационните мъгли също се наблюдава значителна междугодишна изменчивост с минимуми през 1987 и 1994 г. (3) и максимум през 1980 г. (19). Не се наблюдава тенденция за намаляване

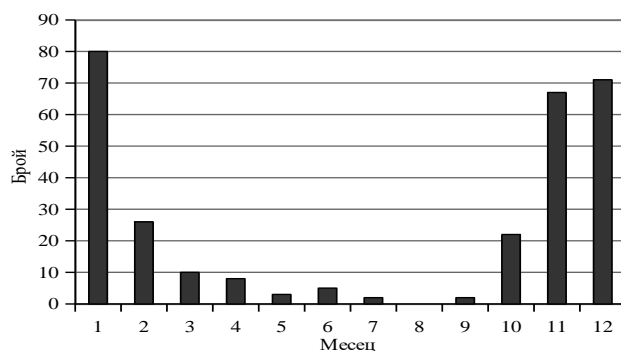
броя на мъглите през разглеждания период. Обяснение на този факт може да бъде потърсено в ефектите от глобалното повишение на температурата, съответната промяна на атмосферната циркулация и режима на валежите.

По данни от МБД на МЦ на ВВС е направена оценка на декадния тренд на температурата за студеното полугодие (октомври–март) в Пловдив за периодите 1980–1989 г., 1990–1999 г. и 2000–2009 г. Докато трендът между първите две десетилетия е $-0,08$ °C/десетилетие и се съгласува с резултатите на Syrakova and Mateev [7], то между второто и третото десетилетие е $+0,42$ °C/десетилетие. Регистрирано е повишение и на средногодишната температура за Пловдив, която за трите десетилетия на разглеждания период е съответно 12,41; 12,67 и 12,73 °C.

Тенденциите при сумарното количество валежи в Пловдив не са толкова добре изразени поради голямата междугодишна изменчивост, но може да се твърди, че валежите през третото десетилетие на разглеждания период надвишават тези през първото десетилетие. Промяна се наблюдава и в средната скорост на вятъра в Пловдив, като през зимния период, за трите разглеждани десетилетия тя е съответно: 3,3; 2,3 и 2,8 m s⁻¹.

Описаните изменения в режимите на температурата, валежите и вятъра, оказват влияние върху процесите на образуване на радиационните мъгли. Повишението на средните температури би довело до намаляване броя на мъглите, но намаляването на средната скорост на вятъра и увеличаването на валежите (респективно влажността на въздуха) действат в обратната посока и като резултат се получава приблизително запазване броя на радиационните мъгли през разглеждания период.

На фиг. 2 е представено месечното разпределение на мъглите, образували се на летище Пловдив.



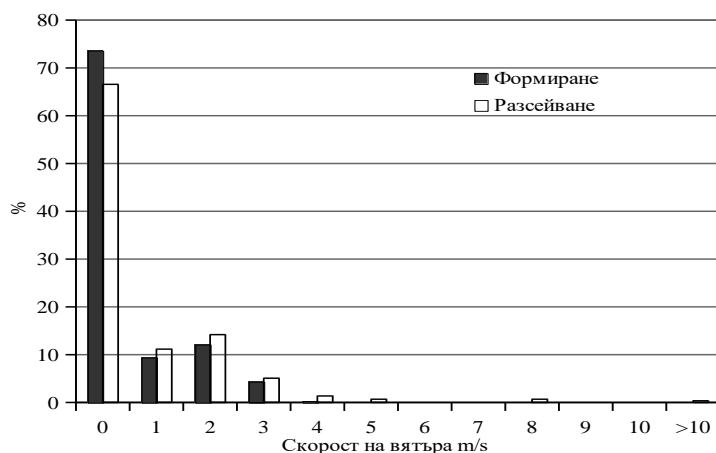
Фиг. 2. Месечно разпределение на радиационните мъгли за летище Пловдив

Както всички видове мъгли, така и радиационните се образуват най-често през есенните и зимните месеци, когато почвата е влажна и изпарява

много, а нощите са дълги и температурата успява да се понижи значително. Най-много радиационни мъгли (80) са се образували през месец януари, следван от декември (71) и ноември (67). Не са регистрирани радиационни мъгли през август.

3.3. ЗАВИСИМОСТ ОТ СКОРОСТТА НА ВЯТЪРА

За образуването на радиационни мъгли е необходимо тихо време. Едно от условията, което се използва за разделяне на радиационните мъгли от останалите, беше в продължение на 5 часа преди падане на мъглата максималната скорост на приземния вятър да е под 3 m s^{-1} . На фиг. 3 се вижда, че в 74 % от случаите с радиационни мъгли, скоростта на вятъра в момента на падане на мъглата е била под 1 m s^{-1} , а само в 3 % от случаите скоростта на вятъра е била 3 m s^{-1} . Сравнението на фиг. 3 с аналогична, но за скоростта на вятъра един час преди регистрирането на мъглата показва, че само в 2 % от случаите на падане на радиационни мъгли на летище Пловдив е наблюдавано увеличение на скоростта на вятъра по време на образуване на мъглата. Отчетен е единичен случай на образуване на радиационна мъгла при скорост на вятъра от 4 m s^{-1} .



Фиг. 3. Процент паднали/разсеяли се мъгли според скоростта на вятъра в часа на образуването/разсейването им

Оценена е и ролята на скоростта на вятъра при разсейването на радиационните мъгли (фиг. 3). Най-голям процент (67 %) от радиационните мъгли се разсейват при тихо време – скоростта на вятъра е под 1 m s^{-1} . Това потвърждава схващането, че основен фактор за разсейване на радиационните мъгли е радиационното затопляне след изгрева на слънцето.

Само в около 8 % от случаите е бил необходим вятър със скорост 3 m s^{-1} и повече, за да бъде разсеяна мъглата.

Потърсена е и зависимост на формирането на радиационни мъгли от посоката на вятъра един час преди падане на мъглата. Розата на вятъра за случаите със скорост, равна или по-голяма от 2 m s^{-1} , показва, че при ветрове от източната четвърт има най-много паднали радиационни мъгли. Причината за това може да бъде потърсена в местоположението на летище Пловдив, североизточно от което текат реките Марица и Чепеларска. Благоприятни за образуването на радиационна мъгла са и ветрове от югозапад (SSW) – това са падащи от Родопите ветрове с малка скорост (под 3 m s^{-1}), висока влажност и ниска температура. В този случай и слабо радиационно охлаждане на подложната повърхност води до формиране на мъгла.

3.4. ВЛИЯНИЕ НА ОБЛАЧНОСТТА

За изясняване влиянието на облачността върху формирането и разсейването на радиационните мъгли са анализирани: количеството обща облачност; долната граница на ниската облачност; случаите, в които небето не се вижда; случаите с ясно небе или долна граница на облачността над 2500 m, регистрирани съответно един час преди падането на мъглата, при падането на мъглата и при нейното разсейване.

Най-често радиационни мъгли падат при ясно време (72 % от случаите), т.е. в часа преди падане на мъглата метеорологичните условия на летището са от типа на т.нар. „прости метеорологични условия”. Това е показател за опасните последици за авиацията, които може да има в резултат на поява на явлението, ако то не бъде прогнозирано надеждно – падането на мъглата в следващия час ще доведе до затваряне на летището и трудности при приземяване на летателните апарати. В 27 % от случаите на радиационни мъгли един час преди падането им е регистрирана средна или висока облачност най-вече с количество $2\div 3/10$ и само в 1 % от случаите са наблюдавани ниски облаци.

В часа на падане на мъглата най-често небето продължава да се вижда (т.е. тя е тънка) – 65 % от случаите. В 29 % от случаите образувалата се радиационна мъгла е била с достатъчна дебелина и видимост, непозволяващи да се вижда небето. В 6 от случаите небето се е виждало частично.

В 43 % от случаите след падане на радиационна мъгла небето остава ясно, в 22 % от случаите е регистрирана средна и висока облачност, най-вече с количество до $5/10$, и само в 4 % от случаите са наблюдавани ниски облаци с долна граница под 1000 m. Въпреки малкият им брой (13), именно

последните случаи на наличие на ниска облачност в комбинация с мъгла са най-опасни за осъществяване на полетите.

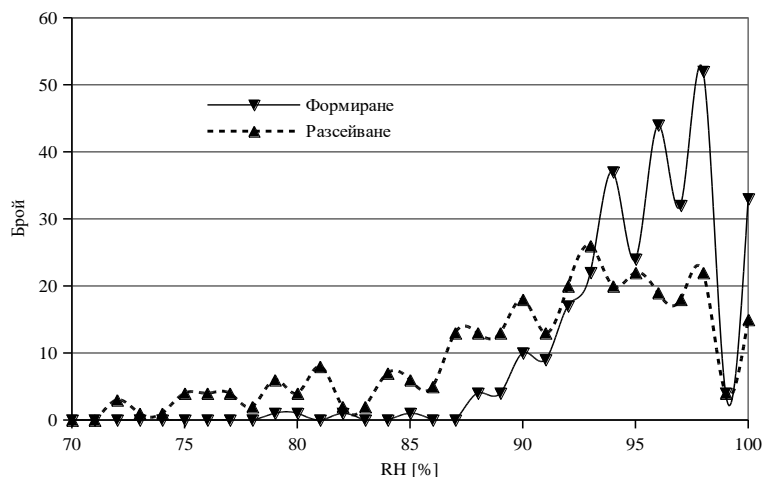
В 30 % от случаите при разсейване на радиационните мъгли небето е било ясно, а в 20 % от случаите е наблюдавана средна и висока облачност с количество до 5/10, което е предпоставка за по-лесното им разрушаване от радиационното нагряване след изгрева на слънцето. Съществено е да се отбележи, че в 25 % от случаите при разсейването на мъглата са регистрирани ниски облаци с долна граница под 1000 m и количество над 5/10. Това показва важността на друг фактор, водещ до разрушаване на радиационните мъгли, а именно, намаляване на нетното излъчване на дълговълновата радиация от върха на мъглата при наличие на ниска облачност.

3.5. ОТНОСИТЕЛНА ВЛАЖНОСТ

За да се образува мъгла, е нужно голямо влагосъдържание на въздуха, което да осигури голяма относителна влажност (малък дефицит на влажността) във вечерните/нощните часове. При голям начален дефицит ($T - T_d$) и увеличаването му с височината мъгла обикновено не се образува [2, 3, 6]. Мъглата достига дотам, докдето разликата $T - T_d$ започва да се увеличава рязко (т.е. въздухът нагоре е доста по-сух). В някои случаи това може да стане още под горната граница на инверсионния слой, т.е. мъглата може да не се разпространи в целия инверсионен слой.

Анализът на относителната влажност на въздуха в часа преди образуване на мъглата показва, че само в около 5 % от всички случаи е възможно падането на мъгла, ако относителната влажност е под 85 %. За радиационните мъгли този процент е 8%, но ако е измерена влажност на въздуха над 90 %, вероятността за падане на радиационна мъгла в следващия час е около 80 %.

От фиг. 4 се вижда, че в часа на падане на мъглата относителната влажност е най-често в интервала 93–100 %, като най-много са случаите с относителната влажност 98 %. Само в около 1 % е наблюдавано падане на мъгла при относителна влажност на въздуха под 85 %. Тези изводи са валидни както за радиационните, така и за останалите видове мъгли.



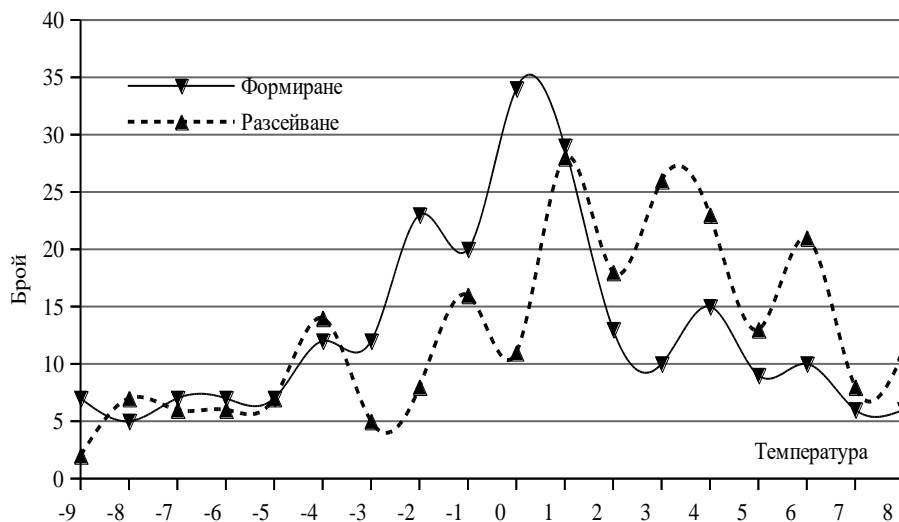
Фиг. 4. Относителна влажност на въздуха в часа на образуване/разсейване на мъглата

Относителната влажност на въздуха остава висока и при разсейване на мъглите (фиг. 4). Сравнението на двете графики на фиг. 4 показва съществена разлика при относителна влажност под 90 %, което е индикация, че в някои случаи за разсейване на мъглите е необходимо значително понижение на влажността на въздуха. 1 % от случаите на радиационни мъгли са се разсеяли при относителна влажност 72 %.

3.6. ТЕМПЕРАТУРА НА ВЪЗДУХА

На фиг. 5 са показани случаите на падане на мъгла при различни температури на въздуха. Вижда се, че най-често мъглите се формират при температура между 0 и 1 °С. Съществува и вторичен максимум при 5 °С, който в часа преди падане на радиационните мъгли е на 7 °С. Това показва, че при положителни температури на въздуха е необходимо понижение на температурата с около 2 °С, за да се достигне до мъглообразуване. В повечето случаи при отрицателни температури е необходимо охлаждане на въздуха с около 1 °С. Интервалът между -3 и +3 °С е потенциално най-опасен за падане на мъгли.

Благоприятните условия за охлаждане на приземния слой и развитие на радиационни мъгли при температури на приземния въздух, близки до 0 °С (в интервала от -2 до +3 °С, фиг. 5), водят до падане на най-гъстите и с най-голяма дебелина мъгли и следователно най-трудно е и тяхното разсейване.



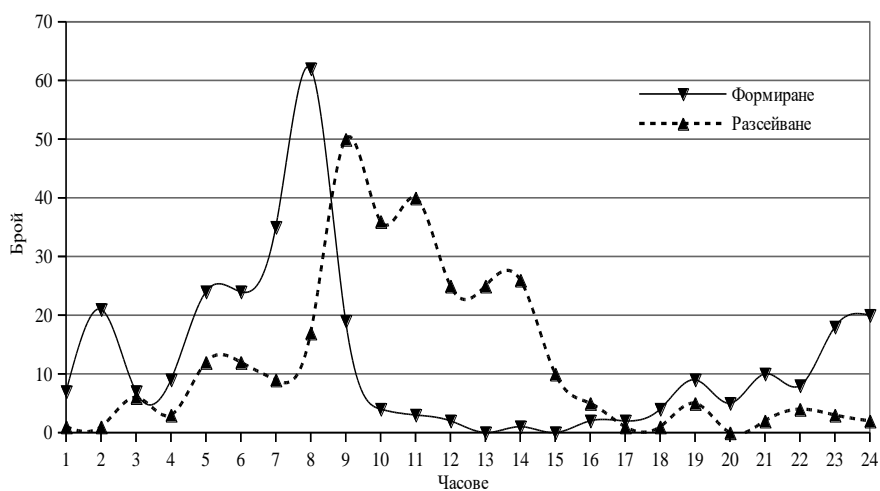
Фиг. 5. Температура на въздуха в часа на образуване/разсейване на мъглата [°C]

С оглед на целите на настоящото изследване е разгледан и броят случай с радиационни мъгли в зависимост от температурата на въздуха 5 часа преди падане на мъглата. Отново се открояват два температурни интервала, в които силно нараства вероятността за образуване на радиационна мъгла. Те са от -3 до $+4$ °C (за мъглите около 0 градуса) и от $+7$ до $+10$ °C (за „топлите“ мъгли). Съществува и трети максимум, който е по-слабо изразен – от -10 до -8 °C, съответстващ на преохладените мъгли. По същество това са температурни интервали, когато в условие на малка облачност и слаб вятър трябва да бъде завишено вниманието на осигуряващите полетите метеоролози.

Подобен е и видът на кривите, даващи разпределението на броя мъгли в зависимост от температурата в момента на разсейването им (фиг. 5), но максимумите са отместени с около 1°C надясно – радиационните мъгли се разсейват най-често при температура 1–2°C. Това означава, че в много случаи повишение на температурата само с няколко градуса е достатъчно, за да започне разсейване на мъглата. Разбира се, не би трябвало да очакваме, че графиките на фиг. 5 ще съвпадат при транслиране на абсцисната ос, тъй като в процеса на разсейване на радиационните мъгли участват и редица други фактори, описани по-горе в изложението. Разликите между двете графики на фиг. 5 показват и невъзможността за директно приложение за летище Пловдив на методите за прогноза на радиационните мъгли, предложени в други изследвания [1, 4, 6], ако не се разполага с допълнителна специфична информация за конкретното летище.

3.7. ЧАС НА ОБРАЗУВАНЕ И РАЗСЕЙВАНЕ НА РАДИАЦИОННИТЕ МЪГЛИ. ПРОДЪЛЖИТЕЛНОСТ

Образуването на мъгла има добре изразен денонощен ход. На фиг. 6 е отразено разпределението на честотата на мъглите според часа на образуването им. Графиката показва силното влияние на радиационното охлаждане върху образуването на мъгла. Вижда се, че през деня радиационни мъгли не се образуват. Основният максимум е в сутрешните часове, т.е. часовете на с минимални стойности на температурата (между 07:00 и 08:00 часа локално време). Вторият максимум е между 21:00 и 02:00 часа и е характерен най-вече за декември-януари. Той може да се обясни с това, че в резултат на по-силното изпарение през деня влагосъдържанието на въздуха се увеличава и вечерта, когато температурата започва да пада, се увеличава относителната влажност, в резултат на което може да се образува мъгла. Ако мъглата не се е образувала по това време, вероятността да се образува в следващите часове е сравнително малка и се увеличава към часовете преди изгрева на слънцето, когато температурата е най-ниска.



Фиг. 6. Час на образуване/разсейване на мъглите

На фиг. 6 е представена и графика на часа на разсейване на мъглите. Най-много мъгли на летище Пловдив се разсейват в интервала между 09:00 и 11:00 часа. Повишаването на температурата на приземния слой продължава средно до около 15:00–16:00 часа, след което температурата започва устойчиво да намалява. Основната причина за разсейване на

радиационните мъгли е намаляването на водността им вследствие изпаряване на капчиците мъгла при повишаване температурата на въздуха след слънчевия изгрев. Така че щом една радиационна мъгла не се е разсеяла до 15:00–16:00 часа, то тя много малко вероятно е да се разсее и по-късно по радиационни причини. Нещо повече, след този момент поради охлаждане на приземния слой въздух мъглата започва да се уплътнява (интензифицира) и да увеличава вертикалните си размери. Тези процеси продължават през цялата нощ и намалява вероятността за разсейване на радиационната мъгла след изгрева на слънцето на следващия ден.

Продължителността на радиационните мъгли на летище Пловдив за разглеждания период варира между един час и 3 дни. Радиационните мъгли паднали в интервала 05:00–09:00 часа най-често са с продължителност от 1 до 6 часа. Характерна особеност е, че образувалите се скоро след залеза на слънцето радиационни мъгли, макар и по-малко на брой, са с голяма продължителност, достигаща до 3 денонощия.

Образувалите се през първата половина на денонощието радиационни мъгли (от 01:00 до 12:00 часа) са 208 или около 70 % от общия брой такива мъгли, но тяхната продължителност рядко надвишава 24 часа (6 случая). В 28 % от тези случаи мъглата се е разсеяла в следващия един час. Голяма опасност при провеждане на полетите са мъглите, образували се след 08:00 часа, които макар и не много на брой (26 случая), могат да препятстват кацането на вече излетелите екипажи. Ето защо надеждното прогнозиране на падането и разсейването на радиационните мъгли е от първостепенна важност при планирането и провеждането на полетите.

4. ПРОГНОЗА НА РАДИАЦИОННИТЕ МЪГЛИ НА ЛЕТИЩЕ ПЛОВДИВ

4.1. ИЗБОР НА МЕТОД ЗА ПРОГНОЗА И ПРЕДИКТОРИ

Проблемът за надеждна прогноза на мъглите е все още недостатъчно добре решен. Наред с класическите статистически методи, базирани на обработка на експериментални данни [2, 4, 6], през последните години все по-често се използват числени модели при прогноза на мъглите. Все по-широко става и използването на спътникови данни. Прилагането на числени методи за прогноза на мъглите е свързано с редица трудности – необходим е локален числен модел с пространствена разделителна способност около 1 km, осигурен с подходящи начални и гранични условия. Допълнително, изборът на адекватни параметризационни схеми също е трудна задача, като се има предвид силната зависимост при образуване на мъглите от локалните условия. Използването на спътникови данни при определяне на началните условия също е проблематично,

доколкото наземните измервания са ежечасни, а орбиталният период на спътниците с полярна орбита е около 100 min и те минават над дадена точка от земната повърхност 2 пъти на ден в приблизително едно и също време. Данните от геостационарните спътници са с недобра пространствена разделителна способност [1].

За нуждите на планирането на полетите на летище Пловдив прогнозата на радиационните мъгли трябва да бъде базирана на надеждна метеорологична информация и да не изисква голям брой допълнителни пресмятания. Това може да бъде осъществено чрез използване на статистическите методи за прогноза на мъглите. Невъзможно е директното прилагане за летище Пловдив на методите, споменати в раздел 2. Все пак идеите от тези методи са полезни при избора на метеорологичните елементи, които да бъдат използвани при прогнозата. В това отношение е взаимстван опитът от предишни изследвания [2, 4, 6] за отчитане на зависимостта на температурата на падане на мъглата от температурата на точката на оросяване и нейното изменение във времето и зависимостта на температурата на разсейване от температурата на падане на мъглата.

При провеждането на регресионен анализ е съществено да бъдат избрани оптимален брой предиктори [8]. При метеорологичните приложения, често се случва да съществува силна корелация между отделните предиктори и включването на голям брой предиктори не води до повишаване коефициента на множествена корелация. В конкретния случай на радиационни мъгли на летище Пловдив още при селектирането на радиационните мъгли са поставени условия за скоростта на вятъра и общата облачност. Допълнително радиационните мъгли се образуват при формиране на приземна инверсия на температурата и често при атмосферно налягане над нормата – условия, при които обикновено вятърът е слаб. Очевидно е също, че при построяването на регресионната зависимост на температура на разсейване на мъглата (T_p) няма смисъл да се взема предвид температура на точката на оросяване в часа на падане на мъглата (Td_p), която е свързана с температура в часа на падане на мъглата (T_p). От фиг. 4 е видно, че най-много случаи на падане на радиационна мъгла има при относителната влажност 98 %. Това заедно с резултатите от предишни изследвания [2] и необходимостта от издаване на своєвременна прогноза дава основание да се ограничи изборът на предиктори, както следва:

- T_{-5} и Td_{-5} , като предиктори за T_p ;
- T_p , като предиктор за T_p ,

където T_{-5} и Td_{-5} са съответно температурата на въздуха и температурата на точката на оросяване 5 часа преди падане на мъглата.

По този начин задачата за прогноза на радиационните мъгли на

летище Пловдив се свежда до намиране на регресионни уравнения, даващи зависимостта на температурите на падане и разсейване на мъглата от температурата и точката на оросяване 5 часа преди мъглообразуването.

Образуването на радиационни мъгли на летище Пловдив има добре изразена сезонност и може да се осъществи в сравнително широк интервал от температури на въздуха. Зависимостта от точката на оросяване е по-слаба. Ето защо, освен регресионни уравнения, получени по цялата съвкупност от данни (296 случая), са изведени и регресионни уравнения за всеки от месеците със значим брой мъгли. Основанията за това са видни от табл. 1. В нея са представени средните стойности на $T_{п}$, T_{-5} , $Td_{п}$, Td_{-5} , T_p и съответните разлики $T_{п} - T_{-5}$, $Td_{п} - Td_{-5}$ и $T_p - T_{п}$. Температурите са в °C.

Таблица 1. Средни стойности на температурата и точката на оросяване при образуване на мъглата 5 часа преди това и температура при разсейване на мъглата

Месец	$T_{п}$	T_{-5}	$T_{п}-T_{-5}$	$Td_{п}$	Td_{-5}	$Td_{п}-Td_{-5}$	T_p	$T_p-T_{п}$
Януари	-0,9	1,1	-2	-1,6	-0,6	-1	2,2	3,1
Февруари	-2,4	0,25	-2,6	-3	-1,5	-1,5	2,6	5
Март	1,5	4,8	-3,3	0,8	2,8	-2	4,9	3,4
Октомври	0,3	3,3	-3	-0,7	1,1	-1,8	3,0	2,7
Ноември	-0,9	2,1	-3	-1,5	0,4	-1,9	2,1	1,2
Декември	-0,0	3,5	-3,5	-0,5	1,5	-2	2,8	2,8
Средно	-0,4	2,5	-2,9	1,1	0,6	-1,7	2,9	3

Вижда се, че за да падне мъгла, е необходимо средно понижение на температурата от около $-2,9$ °C, а за T_d – съответно около $-1,7$ °C. Необходимо е средно повишение на температурата с около 3 °C, за да се разсее радиационната мъгла. През различните месеци се наблюдават значителни отклонения от тези средни.

4.2. РЕГРЕСИОННИ УРАВНЕНИЯ

За намиране на регресионните уравнения за температурите на падане и на разсейване на радиационната мъгла е използвана е функцията LINEST от Excel (линейна регресия). Целта е няколко часа преди да падне мъгла да се прогнозира температурата, при която тя пада. Съответно след нейното падане – температурата на разсейването ѝ. Естествено, ако се използват като предиктори не T_{-5} и Td_{-5} , а измервания в следващи моменти, коефициентите на корелация биха били по-големи, но с оглед на необходимото време за подготовка на полетите, това губи смисъла си.

Построени са множество линейни регресионни уравнения с използване на цялата съвкупност от данни (296 случая) и за всеки от

месеците със значим брой мъгли. Трябва да се отбележи, че поради малкия брой паднали мъгли през февруари, март и октомври, информативността на извадката е малка и съответно е необходимо добавяне на още данни (от бъдещи измервания), за да се увеличи стабилността на коефициентите в регресионните уравнения и повиши надеждността на прогнозата.

Полученото уравнение за T_n на базата на всички случаи с радиационни мъгли е

$$T_n = -0,66 - 0,14T_{n-5} + 1,14Td_{n-5}.$$

Полученото уравнение за T_p на базата на всички случаи с радиационни мъгли е

$$T_p = 2,97 + 0,89T_n.$$

За оценка на качеството на линейната връзка и качеството на прогнозата могат да бъдат използвани: коефициентът на линейна корелация, три вида грешки (средна грешка, средна абсолютна грешка, стандартна грешка) [9]. Коефициентът на корелация (R) определя качеството на линейната връзка между зависимата (предсказвана) и независимата (предсказваща) променлива (променливи). Стандартната грешка на оценката (σ_{est}) е мярка за точността на прогнозата и служи за оценка за „разпръснатостта“ на изходните данни около регресионната линия. По-коректно е в случая σ_{est} да се нарече средна сума от квадратите на несъответствията [8]. Средната грешка (ME) служи за характеризиране отместването на прогнозата и близостта на разпределението на грешките до нормалното ($ME = 0$). Средната абсолютна грешка (MAE) служи за оценка на големината на абсолютните отклонения. При случайни грешки (подчинени на нормалния закон) е в сила $MAE = 0,8RMSE$, където $RMSE$ е средно квадратичната грешка.

В табл. 2 са представени оценките на регресионните уравнения. С наклонен шрифт са дадени оценките, получени с помощта на изведените регресионни уравнения за всеки месец поотделно, а с прав шрифт – тези с регресионните уравнения, получени по цялата съвкупност от данни.

Средните отклонения (ME), пресметнати с използване на регресионните уравнения за всеки месец, не са дадени в таблицата, понеже те са от порядъка на 10^{-3} . При използване на регресионното уравнение, даващо температурата на падане на мъглата, най-големи са стойностите на ME за месеците януари и декември, като през януари тенденцията е да се прогнозира падане на радиационна мъгла при по-ниски температури от реално наблюдаваните, а през декември – по-високи. Това би довело до грешка в прогнозата на падане на мъгла с около 1 час, което е сравнително добра точност от гледна точка на планирането на полетите.

Таблица 2. Оценки на регресионните уравнения

Грешки Месец	Ср. грешка (ME) [°C]	Ср. абсолютна грешка (MAE) [°C]	Коефициент на корелация (R)	Стандартна грешка (σ_{est}) [°C]
за T_n – всички случаи	-0,01	1,52	0,95	1,82
Помесечно за T_n				
Януари	-0,56	1,56 1,66	0,94	2,52 2,4
Февруари	0,03	1,54 1,26	0,96	2,04 1,87
Март	0,36	1,16 0,96	0,93	1,84 1,59
Октомври	-0,15	1,16 1,07	0,93	1,61 1,53
Ноември	0,36	1,79 1,81	0,95	2,54 2,49
Декември	0,6	1,43 1,32	0,97	1,87 1,74
за T_p – всички случаи	-0,0003	2,4	0,89	3,09
Помесечно за T_p				
Януари	-0,03	2,58 2,52	0,87	3,24 3,22
Февруари	-1,82	2,83 2,42	0,87	3,74 3,16
Март	-0,61	1,84 1,85	0,82	2,5 2,38
Октомври	0,26	1,72 1,67	0,77	2,61 2,56
Ноември	0,15	2,14 2,16	0,93	2,74 2,73
Декември	0,19	2,34 2,31	0,89	3,01 2,99

При оценката на температурата на разсейване на мъглите най-същественото отклонение е през февруари – прогнозата по регресионното уравнение дава разсейване на мъглата при достигане на по-високи температури от реално регистрираните. Такава тенденция се наблюдава и за месец март. Причината за това може да бъде обяснена с факта, че повишаването на приземната температура не е единственият фактор, водещ до разсейване на мъглите.

Стойностите на средните абсолютни (MAE) и стандартни грешки (σ_{est}) показват, че данните от наблюденията са добре групирани около регресионните линии. Това е валидно в по-голяма степен за температурата на падане на мъглата, отколкото за температурата на разсейване на мъглата. Анализът на данните (XY-scatter plot) показва, че по-големите грешки се дължат на отклонението от регресионните прави на единични случаи, при които най-вероятно са се намесили други фактори, водещи до образуването или разсейването на мъглите. Този извод е подкрепен и при анализа на грешките, получени след построяване на регресионни прави за отделните месеци (наклонените числа в табл. 2). Разликите между тези грешки и грешките при използване на регресионните уравнения за цялата съвкупност данни са малки.

Анализът на грешките при прогноза на $T_{\text{п}}$ с използване на регресионните уравнения за цялата съвкупност от данни показва, че те са случайни, с разпределение, много близко до нормалното. В повечето от случаите $ME \approx 0$; $MAE \approx 0,8RMSE$; а $R > 0,93$. Това не е валидно за месеците с по-малък брой мъгли (февруари, март, октомври).

За $T_{\text{р}}$ линейната връзка е по-слаба – R е около 0,90, и само в няколко случая $MAE \approx 0,8RMSE$.

Направени са оценки за значимостта на корелационните коефициенти чрез дисперсионен анализ. Използван е т.нар. F -критерий [8]. При ниво на значимост 0,05 и зададените параметри на съвкупността от всички данни, по които са намерени регресионните уравнения, критичните стойности на F са съответно 2,64 и 3,03, а изчислените стойности на F са съответно 4,6 и 4,0 за уравненията за $T_{\text{п}}$ и $T_{\text{р}}$. Това потвърждава наличието на статистически значима зависимост между $T_{\text{п}}$ и $T_{\text{р}}$, от една страна, и $T_{\text{п}}$, $T_{\text{п-5}}$ и Td_{-5} , от друга.

При анализарането на резултатите от регресионния анализ, проведен по данните за отделните месеци, се оказва, че изчислените стойности на F -критерия са по-малки от критичните за месеците март и октомври, т.е. зависимостта на $T_{\text{п}}$ и $T_{\text{р}}$ от предикторите е статистически незначима. Това явно се дължи на малкия брой данни за тези месеци.

4.3. ТЕСТ НА РЕГРЕСИОННИТЕ УРАВНЕНИЯ

Получените резултатите са оценени като много добри. Следващата стъпка е оценка на регресионните уравнения по независима съвкупност. За целта са използвани данните за радиационните мъгли за периода януари 2012 г.–февруари 2014 г., които не са включвани при построяването на регресионните уравнения. През 2012 г. от общо 46 паднали мъгли 16 случая отговарят на условията за радиационна мъгла (7 през януари, 3 през февруари, 1 през октомври, 4 през ноември и 1 през декември). През 2013 г. случаите с радиационни мъгли са 10, а през първите 2 месеца на 2014 г. – 7. Независимата извадка, по която са оценени регресионните уравнения, е общо от 33 случая с радиационни мъгли на летище Пловдив.

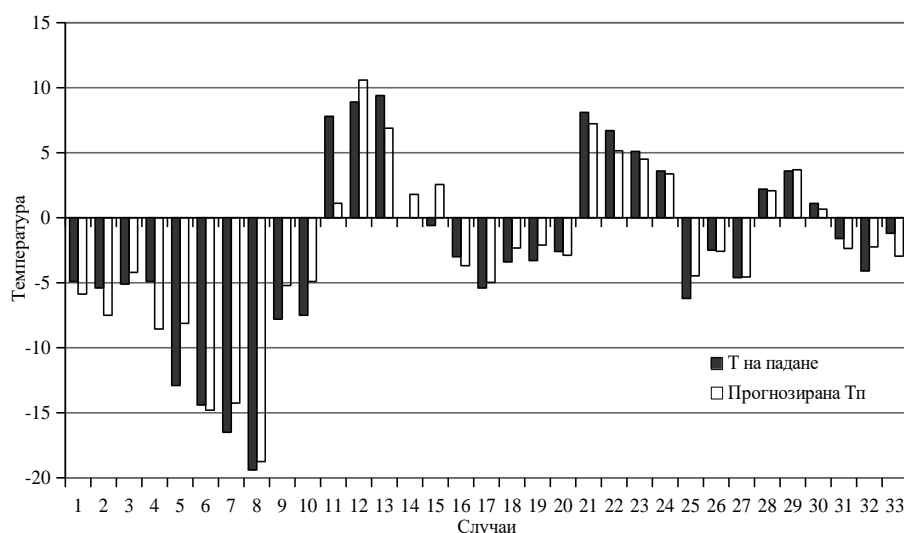
В табл. 3 са представени грешките при пресмятането на $T_{\text{п}}$ и $T_{\text{р}}$ за независимата съвкупност (2012–2014 г.). Стойностите в таблицата са изчислени при използване на регресионните уравнения, получени по цялата съвкупност от данни за периода 1980–2011 г.

Таблица 3. Оценки на регресионните уравнения по данните за 2012–2014 г.

Грешки	Ср. грешка (ME) [°C]	Ср. абсолютна грешка (MAE) [°C]	Коефициент на корелация (R)	Стандартна грешка (σ_{est}) [°C]
$T_{п}$	0,17	1,59	0,95	2,12
$T_{р}$	-0,1	2,34	0,92	3,11

Използването на регресионните уравнения, получени по данни за отделните месеци, не променят съществено стойностите на оценките, дадени в таблицата.

На фиг. 7 и 8 са представени графики на измерените и прогнозираните по регресионните уравнения температури на падане и на разсейване на мъглите за 2012–2014 г. Очевидно е, че разликите между прогнозните и действителните температури са малки, което е основание да се предложи използването на регресионните уравнения в практиката при оценка вероятността за падане и разсейване на радиационни мъгли на летище Пловдив.

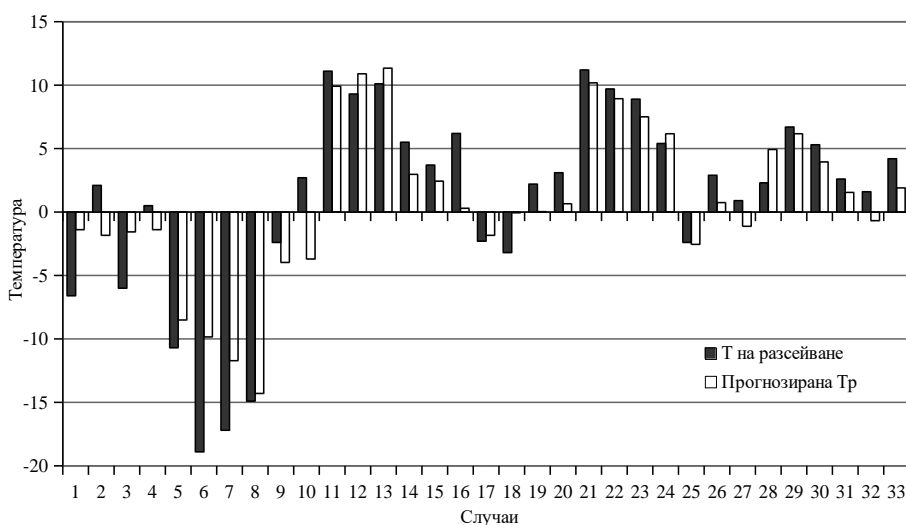


Фиг. 7. Температура на падане на радиационна мъгла – 2012–2014 г.

На графиките са очевидни и няколко съществени разлики между прогнозираните и наблюдаваните температури. Например на фиг. 7 при 5-ти случай (29.01.2012 г.) прогнозната температура за падане на радиационна мъгла е $-8,1$ °C, измерената $T_{п-5}$ е $-4,5$ °C, мъгла е паднала при $-12,9$ °C. Понижение на температурата с $8,4$ °C за 5 часа е необичайно голямо и вероятно не се дължи единствено на радиационно охлаждане. Анализът на синоптичната обстановка в края на януари 2012 г. показва, че територията на

България попада в южната периферия на обширен антициклон с център над Скандинавския полуостров. Времето е тихо. Във височина над 800 hPa е разположен сух и относително топъл въздух.

През нощните часове се формира мощна приземна инверсия на температурата. През деня температурната инверсия се трансформира в приповдигната. Съществено е да се отбележи в този случай, че мъглата се образува в 22:00 часа, след изясняване на небето (отчетена е само разкъсана висока облачност), над снежна покривка с дебелина над 15 cm и е характеризирана като “мъгла, отлагаща скреж” (49 от FM-12 SYNOP).



Фиг. 8. Температура на разсейване на радиационна мъгла за 2012–2014 г.

На фиг. 8, най-голямо разминаване между действителната температура на разсейване на радиационните мъгли и прогнозираната е при случай 6 (30.01.2012 г.). При него мъглата е паднала в 23:00 часа при температура – 14,4 °C, а се е разсеяла при температура –18,9 °C. Синоптичните условия са почти същите, както при случай 5. Мъглата отново е характеризирана като “мъгла, отлагаща скреж”.

Тези два случая (5 и 6) показват необходимостта от специално разглеждане на преохладените мъгли с отлагане на скреж, при които са важни микрофизичните процеси при образуване и разсейване на мъглата. При наличието на снежна покривка (лед) пъргавината на наситените водните пари е по-малка от тази над водна повърхност. И в двата случая относителната влажност на въздуха в момента на формиране на мъглата е била 92 %. Отлагането на скреж води до намаление на водността на въздуха

в приземния слой и до образуване и разсейване на мъглите при по-ниски температури от прогнозираните.

Голяма разлика между прогнозираната и наблюдаваната температура на падане на мъглата на фиг. 7 има и при 11^{-ти} случай (27.10.2012 г.). Мъглата е паднала при 7,8°C (в 09:00 часа), като температурата $T_{п-5}$ е била 6,1 °C. Анализът на синоптичната обстановка показва, че над територията на България е преминал слабоизразен топъл фронт на средиземноморски циклон и слаб полъх ($1-2 \text{ m s}^{-1}$) от югоизток пренася влажен, относително топъл въздух над летище Пловдив.

От последното става ясно, че за по-надеждно прогнозиране на мъглите на летище Пловдив в случаите с промяна на режима на падане и разсейване на мъглите (от радиационен към радиационно-адвективен) е необходимо използването и на синоптичната прогноза. Друга възможност е изведените регресионни уравнения да се прилагат при всяко ново получаване на данни от наблюденията (ежечасно), при което при актуализирането на T , $T_{п-5}$ и Td_{-5} ще се актуализира и прогнозата за T_n и T_p .

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящото изследване е проведен климатичен анализ на формирането и разсейването на радиационните мъгли на летище Пловдив. Определени са най-важните за целите на авиационното осигуряване характеристики на мъглите. Получени са регресионни уравнения, с помощта на които може да се определят температурите на падане и разсейване на радиационните мъгли на летището по данни от ежечасните метеорологични наблюдения. Проверката на регресионните уравнения по независима извадка от случаи с мъгла показва възможността за прилагане на използвания подход в непосредственото метеорологично осигуряване при прогнозата на радиационни мъгли на летище Пловдив. Предстои включване на получените уравнения в системата за вътрешен обмен на метеорологични данни и продукти на ВВС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] COST 722, Short range forecasting methods of fog, visibility and low clouds. EU22978, 2008.
- [2] Годев, Н., Синоптична метеорология. София, 1976.
- [3] Saunders, W. E. *Meteorol. Mag.*, 1950, **79**, 213.
- [4] Зверев, А.С. Синоптическая метеорология. Ленинград, 1977.
- [5] Богаткин, О. Г. Авиационная метеорология. Санкт-Петербург, 2005.
- [6] Богаткин, О. Г. Авиационные прогнозы погоды. Санкт-Петербург, 2010.
- [7] Syrakova, M., V. Mateev. *Bulgarian Geophysical Journal*, 2009, **35**, 33.
- [8] Сираков, Д., Статистически методи в метеорологията. София, 1981.
- [9] Русев, А. Изследване на радиационните мъгли на летище Пловдив. Дипломна работа,

ОКС “Магистър”, Физически факултет на СУ, кат. “Метеорология и геофизика”, 2013.